

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (19), 2023

Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029

Тверь 2023

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Главный редактор: Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

Заместители главного редактора:

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Сульман М.Г., д.х.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

Ответственный секретарь: Афанасьева Л.Е., к.ф.-м.н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение»

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор, ВолгГТУ

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

По направлению «Материаловедение»

Белов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Гершман И.С., д.т.н., профессор, ВНИИЖТ

Делицын Л.М., д.г.-м.н., главный научный сотрудник, ОИВТ РАН

Кулумбегов Р.В., к.х.н., старший научный сотрудник, ОИВТ РАН

Петропавловская В.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

По направлению «Недропользование и горные науки»

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Мисников О.С., д.т.н., профессор ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГТУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам «Машиностроение», «Материаловедение», «Недропользование и горные науки», «Информационные технологии и телекоммуникации». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н.</i> Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме.....	5
<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Митюрев А.А.</i> Исследование контакта конструкционных металлов в условиях схватывания при повышенных температурах.....	14
<i>Болотов А.Н., Бурдо Г.Б.</i> Герметизация с помощью магнитных жидкостей.....	25
<i>Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В.</i> К методике оценки ресурса фрикционного соединения деталей с покрытием по критерию предельного износа...	33

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Болотов А.Н., Новикова О.О.</i> Контроль намагниченности промышленных постоянных магнитов для магнитосиловых механических систем.....	40
<i>Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В.</i> Повышение трещиностойкости карбонатного бетона.....	46

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Пухова О.В.</i> Оценка влияния технологических параметров на полевую сушку торфяного слоя при его добыче.....	53
<i>Черткова Е.Ю.</i> Аммонизация торфа в полевых условиях.....	62

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н.</i> Моделирование процесса сушки зеленого чая.....	71
<i>Илясов Л.В.</i> Исследования инфракрасного полупроводникового детектора газов.....	84
<i>Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В.</i> Абстрактная модель взаимосвязи существующих методов моделирования информационных систем и наборов идей...	90
<i>Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В.</i> Обзор структуры вычислительной системы, предназначенной для эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды.....	96

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Novikov V.V., Novikova O.O., Bolotov A.N.</i> Structural features and applications of materials formed in electrolyte plasma.....	5
<i>Izmailov V.V., Gusev A.F., Mityurev A.A.</i> Studying the contact of constructional metals under the conditions of seizure at elevated temperatures.....	14
<i>Bolotov A.N., Burdo G.B.</i> Sealing with magnetic fluids.....	25
<i>Izmailov V.V., Afanasieva L.E., Novoselova M.V.</i> On the methodology of a friction connection resource evaluation for coated parts by limiting wear criterion.....	33

MATERIALS SCIENCE

<i>Bolotov A.N., Novikova O.O.</i> Control of the magnetization of industrial permanent magnets for magnetic-power mechanical systems.....	40
<i>Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V.</i> Increasing the crack resistance of carbonate concrete.....	46

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Pukhova O.V.</i> Assessment impact of technological parameters for field drying of the peat layer during its extraction.....	53
<i>Chertkova E.Yu.</i> Field ammonization of peat.....	62

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Fam K.B., Murashev P.M., Bogatikov V.N.</i> Modeling of green tea drying process.....	71
<i>Ilyasov L.V.</i> Infrared semiconductor gas detector research.....	84
<i>Prikhodko D.I., Mokryakov A.V., Gorshkov V.V.</i> Abstract model of the relationship between existing information system modeling methods and a set of ideas.....	90
<i>Prikhodko D.I., Mokryakov A.V., Gorshkov V.V.</i> Expanded internal structure of computer system intended for operation in extreme environmental conditions.....	96

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ПЛАЗМЕ

В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н., 2023

Определены факторы, влияющие на структуру и триботехнические свойства материалов и покрытий, сформированных в электролитной плазме. Рассмотрены основные направления микроплазменного модифицирования поверхности трения деталей: повышение ее твердости и износостойкости, получение коррозионно-стойких и декоративных покрытий, снижение материалоемкости узла трения в целом и замена дорогих материалов. Показано кратное увеличение эксплуатационной стойкости упрочненных трибосопряжений. Приведены примеры получения керамических материалов с твердосмазочным наполнителем, успешно функционирующих в условиях сухого трения или ограниченной подачи смазочного материала. Изложены основы оригинальной технологии получения минералокерамического материала, представляющего собой матрицу из оксида алюминия и дисперсных включений алмаза, показаны его свойства. Даны примеры реализации сформированных микроплазменным оксидированием керамических композиционных материалов в реальных трибоустройствах, указаны результаты экспериментальных исследований их триботехнических характеристик.

Ключевые слова: микроплазменное электролитическое оксидирование, микродуговое оксидирование, покрытие, трение, износ.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-5-13

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных методов инженерии рабочей поверхности узлов трения современной техники является технология оксидирования в электролитной плазме (или микродугового оксидирования (МДО)) [1, 2]. Процесс оксидирования заключается в формировании упрочненного керамического слоя под действием высокого напряжения на поверхности металлов с ярко выраженными вентильными свойствами (Al, Mg, Ti, Zr, Nb, Ta, Be и сплавов на их основе). Технология микроплазменного модифицирования поверхности деталей востребована при модифицировании трибоузлов в машиностроительной, нефтегазодобывающей промышленности, в приборостроении, радиоэлектронике, транспортной, авиационной, космической и других отраслях [1–9].

Характеристики материалов, сформированных в электролитной плазме, определяются совокупностью физико-механических параметров материалов основы, переходного и рабочего керамического слоя. Свойства и структура оксидного

керамического слоя задаются электрическими режимами формирования материала, химическим составом электролита и возможным дальнейшим модифицированием керамической матрицы микро- и наноразмерными трибополнителями [3, 4, 10]. Благодаря универсальности технологии можно получать композиционные керамические покрытия и материалы, характеризующиеся высокими трибомеханическими, электроизоляционными и теплофизическими свойствами. В настоящее время разработаны технологические режимы получения достаточно широкого круга МДО-материалов.

В целом этапы формирования покрытия в процессе микроплазменного оксидирования схожи для МДО-покрытий различных типов. Однако незначительные на первый взгляд нюансы технологии могут привести к диаметрально противоположным результатам (например, можно получить не антифрикционный, а абразивный материал) [11]. Технологии получения перспективных композиционных покрытий, представляющих собой керамическую матрицу, в которую внедрены твердосмазочные дисперсные частицы (полимеры, графит, дисульфид молибдена, нанокорунд и др.), в значительной степени вариативны [7, 12, 13].

Для технологов и конструкторов машиностроительных предприятий достаточно сложно определиться при имеющемся многообразии возможных методов оптимального модифицирования поверхности деталей. Многие перспективные технологии микроплазменного электролитического оксидирования известны в научных кругах и не получили пока широкого применения в реальных механизмах. Не всегда понятна номенклатура оборудования, необходимого для получения композиционного керамического покрытия с заданными физико-механическими свойствами.

Целью работы является анализ основных направлений применения технологии микроплазменного электролитического оксидирования, их преимуществ перед другими методами модифицирования поверхностей, а также изучение структуры и свойств получаемых материалов. Исследование предназначено для ознакомления с ним широкого круга технологов и проектировщиков современного оборудования.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

1. Модифицирование поверхности трения детали методом микроплазменного электролитического оксидирования с целью повышения ее твердости и износостойкости. Данное направление традиционно [1, 2]. В процессе оксидирования на поверхности детали формируется трехслойное покрытие из переходного, рабочего и внешнего технологического слоев. Тонкий переходный слой (толщина 0,01...0,1 мкм) обеспечивает высокую адгезию керамического покрытия с основным металлом. Рабочий оксидный слой толщиной до 100 мкм наиболее функционален, представляет собой сложную структуру из α -, β -, и γ -модификаций оксидов алюминия. Модификация α Al_2O_3 , или корунд, преобладает, так как является наиболее устойчивой. Данный слой покрытия имеет низкую пористость и, благодаря корунду, сочетает высокую микротвердость, контактную жесткость и износостойкость со стойкостью к коррозии. Внешний технологический слой имеет толщину до 200 мкм, обладает существенно меньшей твердостью по сравнению с рабочим слоем, но большей пористостью, фактически имеет рыхлую структуру. В случае оксидирования в щелочном электролите с добавкой жидкого стекла технологический слой состоит из муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. По окончании формирования покрытия рыхлый технологический слой целесообразно удалить шлифованием или пескоструйной обработкой. Рабочий оксидный слой, непосредственно участвующий во фрикционном

контакте, имеет микротвердость до 20 ГПа, а по износостойкости это покрытие сопоставимо с карбидом вольфрама.

В сравнении с известными технологиями оксидирования алюминия и его сплавов, например гальваники, МДО является самым дорогим, сложным и энергоемким. Однако преимущества микроплазменного электролитического оксидирования покрытий (наличие уникальных триботехнических свойств, а также значительная толщина покрытий, если сравнивать с покрытиями, полученными, например, анодированием (толщина слоя до 20 мкм)) делают данную технологию наиболее конкурентоспособной и эффективной в долгосрочной перспективе.

Наиболее рентабельно упрочнение методом микроплазменного электролитического оксидирования фрикционных поверхностей пар трения: подшипников скольжения, зубчатых передач, шкивов, направляющих скольжения, торцевых уплотнений для двигателей внутреннего сгорания и т.д. [1, 3, 5–8]. Установлено, что модификация узлов цилиндропоршневой группы дает повышение износостойкости в 10...15 раз [5].

Обычно покрытия данного типа применяются в присутствии смазочного материала. Однако нами получены хорошие результаты увеличения износостойкости рабочей поверхности деталей прядильной машины, эксплуатирующейся в условиях сухого трения. Износостойкость прядильных роторов увеличилась, возрос срок их службы, уменьшился производственный брак, количество ремонтов оборудования сократилось более чем в 20 раз (рис. 1).



Рис. 1. Узел трения прядильной машины, модифицированный технологией микроплазменного оксидирования

2. Модифицирование поверхности трения методом микроплазменного электролитического оксидирования деталей из легких металлов (Al, Ti, Mg и их сплавы) с целью замены тяжелых металлических сплавов или дорогостоящих композитных материалов. В машиностроении трибоузлы, упрочненные методом МДО, применяются для замены легированной стали, при этом достигается кратное увеличение износостойкости, материалоемкости и теплонагруженности, происходит сокращение механических затрат на 40...50 %, повышение КПД – на 2...15 % [1, 5]. Необходимо отметить также существенное повышение динамических характеристик движущихся трибоузлов, так как плотность алюминия почти в 3 раза ниже плотности стали.

Снижение материалоемкости в сочетании с сохранением и повышением твердости и износостойкости традиционных узлов трения особенно актуально в авиационной, космической и судостроительной промышленности. В аэрокосмической

промышленности важно максимальное снижение массы разрабатываемой конструкции, поэтому даже замена отдельных элементов имеет большое значение. В частности, в статье [9] показано, что замена стали или титана в упорах узла раскрытия космических летательных аппаратов на алюминиевый сплав АМг6М, модифицированный микродуговым оксидированием, оправдана [9]. Упрочненные детали из легкого конструкционного материала обеспечивают в условиях вибрационных нагрузок, повышенного износа, низких температур и вакуума высокую надежность функционирования узла.

3. Применение технологии микроплазменного электролитического оксидирования с целью восстановления исходных размеров изношенных деталей при одновременном повышении их износостойкости и долговечности. Наиболее актуально это направление при работе с деталями сельскохозяйственной, горнодобывающей техники в современных условиях машиностроительного и авторемонтного производств.

Характерной особенностью МДО-технологии является увеличение габаритных размеров детали в процессе оксидирования. Формируемый рабочий слой растет вглубь и наружу от исходной поверхности детали. Технологический слой существенно выходит за первоначальные размеры поверхности. Эту особенность следует использовать в ремонтном производстве. Без дополнительных способов компенсации изношенного материала можно нарастить до 0,1 мм износостойкого керамического слоя [10, 13, 14]. Известны технологии, позволяющие применять микроплазменное электролитическое оксидирование не только для деталей, изготовленных из вентильных металлов. Обойти данное ограничение возможно предварительным нанесением (например, на стальную поверхность) алюминийсодержащих композиций и последующим модифицированием [15].

4. Применение микродугового оксидирования для получения керамической матрицы, в поры которой могут быть внедрены твердосмазочные материалы. Данный метод применяется в случае функционирования трибосопряжений в условиях сухого трения и ограниченной подачи смазочного материала, особенно в тяжело нагруженных узлах трения [4, 8]. Способ возможен благодаря пористости получаемого керамического покрытия, причем размеры пор (0,01...10 мкм) и их концентрацию (5...50 %) можно регулировать электротехническим режимом микроплазменного электролитического оксидирования и составом электролита. Ассортимент используемых наполнителей достаточно широк: полимерные материалы (фторопласты, полиамиды), микро- и наноструктурные графит, дисульфид молибдена, оксид меди, магнетит и др.

Технологии внедрения различных наполнителей в керамическую матрицу тоже существенно различаются, что обусловлено электрическими свойствами твердосмазочных материалов и, соответственно, их влиянием на процесс оксидирования. Например, при модифицировании МДО-покрытия углеродными наноразмерными материалами они вводятся непосредственно в базовый электролит [4, 16]. При этом повышается скорость формирования керамического слоя, его толщина увеличивается, структура становится более равномерной, пористость уменьшается. При модифицировании МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO технология предполагает два этапа: формирование керамической матрицы и непосредственно внедрение оксида меди дуговым электрофорезом в тонкий поверхностный слой покрытия [8].

Были получены хорошие результаты при модифицировании микроплазменным электролитическим оксидированием матрицы, сформированной на алюминии Д1, а также при добавлении дисперсных магнетита, графита и дисульфида молибдена [4].

Введение в коллоидный электролит частиц высокодисперсного магнетита существенно не повлияло на процесс оксидирования. Частицам дисульфида молибдена и графита потребовалась модификация поверхностно-активным веществом при введении в электролит. Сравнительные триботехнические испытания полученных твердо-смазочных композиционных материалов подтвердили их преимущество перед традиционным МДО-покрытием, а также стабильную работоспособность в экстремальных условиях без дополнительной смазки жидкими или консистентными материалами (таблица).

Результаты триботехнических испытаний фрикционных свойств композиционных покрытий с различными наполнителями

Материал наполнителя	Толщина покрытия, мм	Коэффициент трения	Интенсивность линейного износа	Микротвердость, ГПа
MoS ₂	0,1...0,50	0,07...0,11	$5 \cdot 10^{-9}$	10...12
Графит	0,1...0,45	0,10...0,16	$7 \cdot 10^{-9}$	12...14
Fe ₃ O ₄	0,1...0,30	0,15...0,26	$9 \cdot 10^{-9}$	14...17
Без наполнителя	0,1...0,40	0,11...0,25	$15 \cdot 10^{-9}$	12...14

5. Применение технологии микроплазменного электролитического оксидирования для получения инновационных материалов. Синергия свойств материалов матрицы, электролита, дисперсных наполнителей, преобразованных в процессе микроплазменного синтеза, позволяет получать новые уникальные материалы, имеющие широкую область применения.

Нами разработана оригинальная технология получения минералокерамического материала, представляющего собой матрицу из оксида алюминия и дисперсных включений алмаза [11]. Заготовка для изделия формируется из алмазно-алюминиевой смеси методом порошковой металлургии. Дисперсные зерна алмаза предварительно покрываются медью для защиты от чрезмерного окисления и в качестве дополнительного антифрикционного фактора [17]. Минералокерамический слой формируется на поверхности детали в процессе микроплазменного синтеза. При анализе технологии определены оптимальные диапазоны варьирования относительной плотности заготовок, степени металлизации алмазов медью и состава электролита.

Оценка фрикционных свойств полученного материала показала, что зернистость алмазов оказывает определяющее влияние на триботехнические характеристики и область практического применения материала. При использовании алмазов с высокой зернистостью ($> 28/20$) получается минералокерамический материал с высокими режущими характеристиками (рис. 2а). Абразивные круги, изготовленные из этого материала, обладают стабильно высокой объемной режущей способностью (в 1,5...3,5 раза выше традиционных аналогов) и характеризуются высоким алмазоудержанием (рис. 2б).

Минералокерамические материалы с малой зернистостью алмазов ($< 20/14$) характеризуются высокими антифрикционными свойствами в условиях дефицита и отсутствия смазочного материала (рис. 3). Данная характеристика объясняется формированием в керамической матрице включений свободного твердосмазочного графита, образовавшегося при частичном фазовом окислении алмаза.

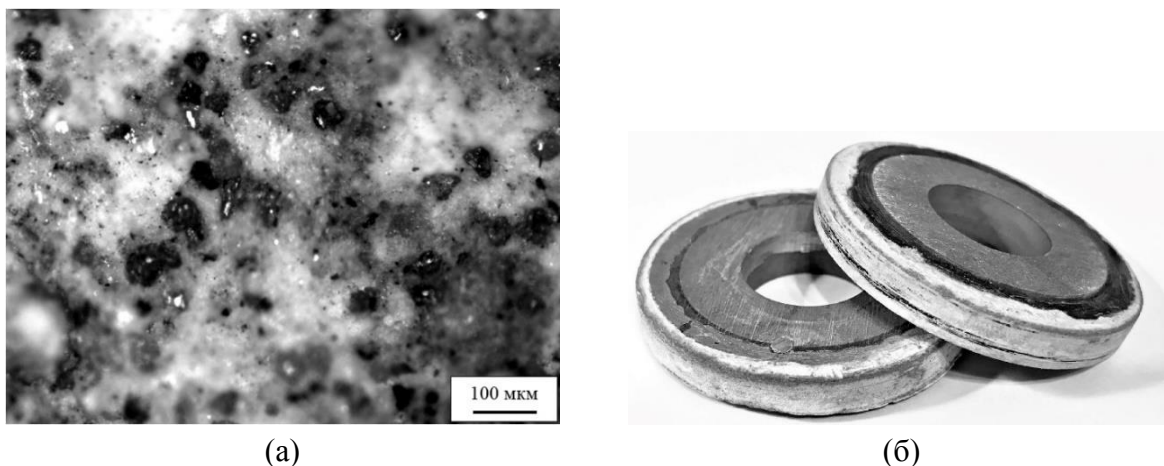


Рис. 2. Изображения структуры поверхности минералокерамического материала (зернистость алмаза 80/63) (а); абразивных кругов с режущим слоем из минералокерамического материала (б)

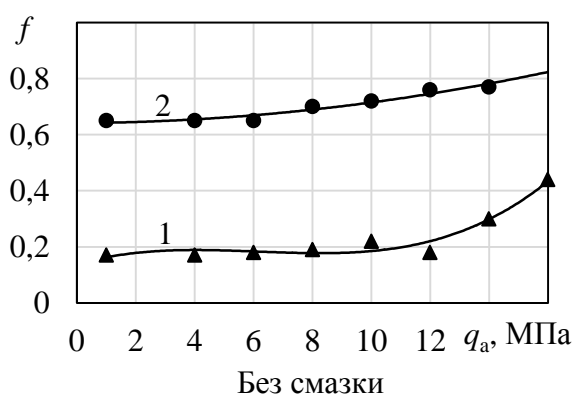


Рис. 3. Коэффициент трения для МДО-покрытий:
1 – алмазосодержащий материал; 2 – Д16 (сплав алюминия)

6. Модифицирование микроплазменным электролитическим оксидированием алюминиевых деталей для защиты от воздействия агрессивных сред: химически активных растворов, морской воды, экстремальных атмосферных воздействий и др. [3, 9, 10, 18]. В статье [19] установлено, что при температуре до 870 °С МДО-покрытия на титановом сплаве ВТ6 (толщина покрытия 45...50 мкм) сохраняли высокую адгезию к подложке и плотность поверхности без признаков питтинга. Коррозионная стойкость формируемых керамических покрытий существенно выше, чем у традиционно применяемых гальванических. Следует отметить высокую экологичность микродугового оксидирования, в отличие от гальванического метода, проводящегося в агрессивных электролитах, где требуются операции промывки, обезжиривания, травления. Лаки на полимерной основе в качестве наполнителя МДО-матрицы могут применяться как подслои под окрашивание в ответственных трибоизделиях, используемых в агрессивных средах. Для нанесения подслоя под окрашивание достаточно сформировать покрытие толщиной 5...10 мкм, что снижает затраты на получение изделия.

Перспективно упрочнение микроплазменным электролитическим оксидированием трибоповерхностей узлов трения, смазываемых современными магнитными смазками [20]. Наряду с очень хорошими антифрикционными и противоизносными

свойствами магнитные смазочные среды оказывают коррозионное воздействие на контактирующие поверхности. Также абразивно изнашивают поверхности агломераты из магнитных частиц, образующиеся в магнитных маслах или жидкостях. Микроплазменное преобразование поверхностного слоя детали в керамический материал позволяет нивелировать негативный эффект агрессивного воздействия таких смазочных сред.

Нами разработана технология получения антикоррозионного декоративного покрытия способом микродугового оксидирования. С целью снижения энергозатрат процесс происходит в две стадии в различных электролитах [21]. В стандартном электролите формируется технологический слой, затем во второй электролит добавляются компоненты, определяющие цвет защитно-декоративного слоя (рис. 4). Микротвердость формируемого покрытия $\sim 5 \dots 10$ ГПа, толщина, достаточная для обеспечения эксплуатационных характеристик, $\sim 20 \dots 30$ мкм.

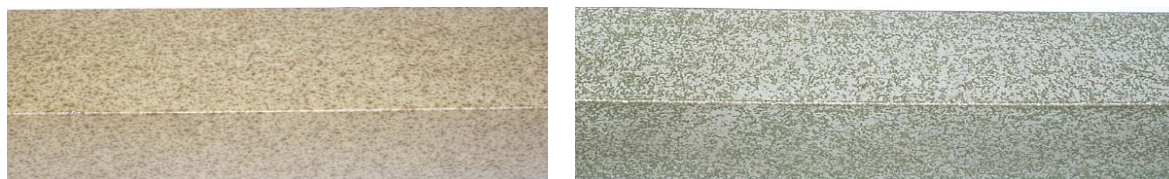


Рис. 4. Внешний вид защитно-декоративных покрытий, полученных методом микроплазменного электролитического оксидирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология микроплазменного электролитического оксидирования позволяет модифицировать поверхность вентильных металлов, формируя на них износостойкий и высокотвердый керамический слой, который можно дополнять разного рода наполнителями (как твердосмазочными, так и абразивными). Основные направления применения таких покрытий и материалов – узлы трения, причем формируемые поверхности обеспечивают стабильную работоспособность и износостойкость в условиях высоких нагрузок, температур и агрессивных сред.

Области применения технологии микроплазменного электролитического оксидирования не ограничиваются приведенными примерами. Разработаны технологии получения биоактивных, электроизоляционных, светотехнических, каталитически активных керамических композиционных материалов. Возможности микроплазменного оксидирования исследованы еще не полностью, функциональное назначение МДО-покрытий будет расширяться. Наиболее перспективным представляется направление создания наноструктурных покрытий под конкретную технологическую задачу. Применение наноразмерных добавок (металлов, оксидов, боридов, углеродных нанотрубок, фуллеренов, ультрадисперсных частиц детонационного синтеза) создает возможность перехода материалов в нанокристаллическое состояние, открывающее принципиально новые свойства вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И.В. Суминов [и др.]. М.: Техносфера. 2011. Т. 2. 512 с.
2. Федоров В.А., Белозеров В.В., Великосельская Н.Д. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов // *Физика и химия обработки материалов*. 1991. № 1. С. 87–93.

3. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. № 389 (1-2). P. 169–176.
4. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.
5. Белозеров В.В., Махатилова А.И., Реброва Е.М. Метод микродугового оксидирования и его перспективы // *Штрипс*. 2008. № 3. С. 30–32.
6. Jiang B.L., Yang W., Su Y. Engineering applications of microarc oxidation and magnetron sputtering // *Heat Treatment of Metals*. 2008. № 33 (1). P. 86–90.
7. Синтез композиционных наноструктурированных керамополимерных функциональных покрытий для торцевых уплотнений / Н.Н. Андрианова [и др.] // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/905.html> (дата обращения: 23.02.2023).
8. Коломейченко А.В. Технология восстановления аргонодуговой наплавкой и упрочнения микродуговым оксидированием деталей из алюминиевых сплавов // *Сварочное производство*. 2004. № 1. С. 44–48.
9. Применение методов микродугового оксидирования при создании конструктивных элементов космических аппаратов / В.К. Шаталов [и др.] // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2014. № 6. С. 183–194.
10. Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V. Formation of wear-and corrosion-resistant ceramic coatings by combined technologies of spraying and micro-arc oxidation // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. V. 92. № 7. P. 875–882.
11. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
12. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.
13. Витязь П.А., Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А. Применение наноструктурных материалов и активированных методов инженерии поверхности для создания современных объектов техники // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 3-4 (20-21). С. 46–66.
14. The Use of Cold Spraying and Micro-Arc Oxidation Techniques for the Repairing and Wear Resistance Improvement of Motor Electric Bearing Shields / Y. Kuznetsov [et al.] // *Energies*. 2022. № 15 (3). P. 912.
15. Кузнецов Ю.А., Марков М.А., Красиков А.В. Формирование износостойких и коррозионностойких керамических покрытий комбинированными технологиями напыления и микродугового оксидирования // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. № 7. С. 819–826.
16. Витязь П.А., Комарова В.И., Комаров А.И. Создание износостойких упрочняющих покрытий микродуговым оксидированием, непосредственной и последующей модификацией углеродными наноматериалами // *Перспективные технологии*. 2011. № 6. С. 114–148.
17. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Синтез композиционного керамического материала и исследование его абразивных свойств // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 22–31.

18. Перспективы применения микродугового оксидирования при создании теплового экрана космического аппарата «Интергелиозонд» / А.О. Штокал [и др.] // *Идеи К.Э. Циолковского в контексте современного развития науки и техники: материалы 53-х научных чтений*. 2018. С. 356–359.

19. Superhydrophobic composite coating for reliable corrosion protection of Mg alloy / S. Song [et al.] // *Materials and Design*. 2022. V. 215. P. 110433.

20. Механические свойства поверхности, смазанной магнитным маслом / А.Н. Болотов [и др.] // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 6–11.

21. Патент РФ 2424381. Способ получения износостойкого покрытия на алюминии и его сплавах / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Васильев М.В., Горлов А.И. Заявл. 07.06.2010. Опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20.

Для цитирования: Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.

STRUCTURAL FEATURES AND APPLICATIONS OF MATERIALS FORMED IN ELECTROLYTE PLASMA

V.V. NOVIKOV, Cand. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: vnvkv@yandex.ru

The factors influencing the structure and tribological properties of materials and coatings formed in an electrolyte plasma are determined. The main directions of microplasma modification of the friction surface of parts are considered: increasing its hardness and wear resistance, obtaining corrosion-resistant and decorative coatings, reducing the material consumption of the friction unit as a whole and replacing expensive materials. A multiple increase in the service life of hardened tribo-couplings is shown. Examples are given of obtaining ceramic materials with a solid lubricating filler that successfully operate under conditions of dry friction or limited lubricant supply. The basics of the original technology for obtaining a mineral-ceramic material, which is a matrix of aluminum oxide and dispersed diamond inclusions, are outlined and its properties are shown. Examples of the implementation of ceramic composite materials formed by microplasma oxidation in real tribodevices and the results of experimental studies of their tribotechnical characteristics are given.

Keywords: microplasma electrolytic oxidation, microarc oxidation, coating, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 27.03.2023; после рецензирования/ revised: 24.04.2023; принята/accepted: 12.05.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ СХВАТЫВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук,
А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Митюрёв А.А., 2023

Изучены условия возникновения схватывания поверхностей металлов при статическом контакте и сдвиге. Исследовано влияние механической нагрузки и повышенных температур на процесс образования адгезионного соединения в контакте. Дано описание экспериментальной установки и методики эксперимента. Получены количественные значения прочности адгезионных соединений и проведен теоретический анализ полученных зависимостей. Показано, что относительный сдвиг контактирующих поверхностей влияет как на порог схватывания, так и на величину коэффициента адгезии при данных температуре и нагрузке. При этом значения температур и нагрузок, при которых начинается схватывание, снижаются, а коэффициенты адгезии увеличиваются.

Ключевые слова: металлический контакт, адгезия, схватывание, температура, площадь контакта, контактное электрическое сопротивление.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-14-24

ВВЕДЕНИЕ

Адгезия и адгезионные технологии широко распространены в природе и технике, начиная от аэрокосмической отрасли и заканчивая легкой промышленностью и медициной [1–3]. Большое значение имеет адгезионное взаимодействие тел в трибологии, так как оно является причиной одного из наиболее распространенных и опасных видов изнашивания – адгезионного, а также одной из причин возникновения силы трения между контактирующими телами [4, 5].

В современной технике в связи с тенденцией возрастания удельных энергетических нагрузок растет число контактных соединений, работающих при повышенных температурах в жестких эксплуатационных режимах. В этих условиях увеличивается вероятность образования в контактах адгезионного соединения металлов в твердой фазе, т.е. схватывания. В подвижных соединениях схватывание ведет к возрастанию энергетических потерь, повышенному износу и, как крайний случай, к потере работоспособности из-за возникновения заедания в контакте. В электроконтактных устройствах схватывание ведет к залипанию контактов, что также может привести к аварийной ситуации.

Значительное количество теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию механизма процесса адгезии и схватывания. Результаты исследований и ряд гипотез для объяснения явления представлены в фундаментальных монографиях [6–8], однако единой теории адгезии не разработано до настоящего времени, так что исследования различных аспектов адгезионного контакта остаются актуальными [1, 2, 9].

Цель данного исследования заключалась в изучении адгезии и схватывания конструкционных металлов при повышенных температурах в статическом контакте и при сдвиге для установления влияния схватывания на основные характеристики контакта металлических поверхностей, определяющие его фрикционные свойства, тепло- и электропроводность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установка для исследования процесса схватывания при повышенных температурах (рис. 1) используется в ходе экспериментального определения характеристик контакта металлических поверхностей при схватывании в статике и при сдвиге.

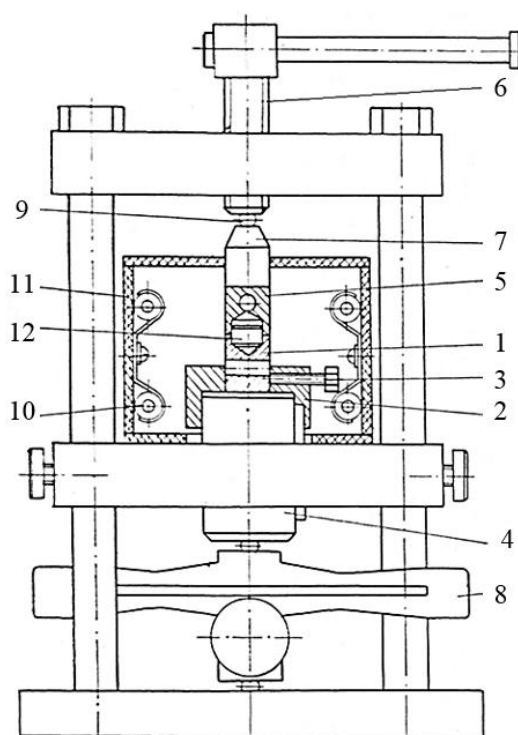


Рис. 1. Схема установки для исследования схватывания металлов при повышенных температурах

Основные узлы установки: система нагружения, узел крепления нижнего образца и нагреватель в изоляционном корпусе. Образцы цилиндрической формы диаметром 20 мм и длиной 25 мм изготавливали точением на токарном станке. Со стороны рабочей торцевой поверхности образца просверлено вдоль оси глухое отверстие диаметром 14 мм для установки в него центрирующей втулки. Образцы контактируют по схеме торцевого трения рабочими поверхностями, имеющими в плане вид колец. В образце также просверлено диаметральное сквозное отверстие, в него вставляется рычаг, с помощью которого осуществляется сдвиг верхнего образца поворотом вокруг вертикальной оси.

Нижний образец 1 укрепляется в оправке 2 и удерживается от поворота вокруг вертикальной оси винтом 3 со стопором. Оправка 2 закреплена на обойме 4 и удерживается от вращения шпонкой. Нагрузка прикладывается к верхнему образцу 5 посредством винта 6 через обойму 7 со шлифованным нижним торцом и измеряется динамометром 8. Верхний образец 5 центрируется шариком 9. Нагрев образцов

производится спиральным нагревателем 10 в изоляционном корпусе 11. При сдвиге образцы центрируются втулкой 12.

Измерение контактного электросопротивления образцов осуществляется методом вольтметра – амперметра по четырехпроводной схеме и производится с помощью цифрового вольтметра постоянного тока и источника постоянного тока. Температура образцов измеряется термометром и хромель-копелевой термопарой, расположенной у контактного стыка.

Рабочие параметры установки:

нормальная нагрузка на образцы 0...20 кН;

номинальная площадь контакта 160 мм²;

интервал рабочих температур 20...450 °С;

рабочий ток нагревателя 0...4 А;

сила тока в измерительной схеме 1...10 А.

Эксперименты проводили по нижеописанной методике.

Торцевые (кольцевые в плане) рабочие поверхности образцов шлифовали на нескольких абразивных порошках с последовательным уменьшением зернистости на притирочной плите для достижения заданной шероховатости поверхности. Шлифованные поверхности обезжиривали полярными и неполярными растворителями, затем насухо протирали.

Для исследования схватывания в статическом контакте устанавливали нижний образец 1 в оправку 2 (см. рис. 1). После установки верхнего образца 5 и обоймы 7 с шариком 9 прикладывали сжимающую контактную нагрузку. Нагревали контактный узел до требуемой температуры в течение 10...20 минут и выдерживали образцы 10 минут. Затем охлаждали образцы 20...30 минут вместе с контактным узлом до комнатной температуры. После этого разгружали образцы, поднимали винт 6 и включали электроизмерительную цепь. Измерения контактного электросопротивления проводили при комнатной температуре. Потом вынимали образцы из обоймы 7 и визуально определяли наличие схватывания. Если образцы схватывались, продолжали эксперимент для определения силы разрыва адгезионных связей при комнатной температуре.

При исследовании схватывания в контакте со сдвигом устанавливали нижний образец 1 в оправку 2 и закрепляли стопорным винтом 3. В полость образца вкладывали направляющую центрирующую втулку 12. После установки верхнего образца 5 и обоймы 7 с шариком 9 прикладывали сжимающую контактную нагрузку. Нагревали контактный узел до требуемой температуры в течение 10...20 минут. Открывали изолирующий корпус 11, не снимая сжимающей нагрузки, рычагом поворачивали верхний образец 5 на небольшой угол вокруг вертикальной оси. Корпус закрывали, контакт нагревали в течение 3...5 минут до требуемой температуры и выдерживали образцы 10 минут. Затем охлаждали образцы 20...30 минут вместе с контактным узлом до комнатной температуры. Разгружали образцы, поднимали винт 6 и включали электроизмерительную цепь. Измерения контактного электросопротивления проводили при комнатной температуре. После этого вынимали образцы из обоймы 2 и визуально определяли наличие схватывания. Если образцы схватывались, продолжали эксперимент для определения силы разрыва адгезионных связей при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование схватывания металлов в статическом контакте. Были исследованы образцы технически чистых металлов различной кристаллической структуры: алюминия, кадмия, меди и сплавов различного химического состава

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 3 (19), 2023

(латуни Л63, титанового сплава ВТ20 и углеродистой стали 45). Испытания проводили на воздухе при температурах от 20 до 400 °С и нормальных нагрузках от 0,5 до 15 кН, что соответствует номинальному давлению в контакте $p_n = N/A_n$ от 3,0 до 90 МПа. На основе результатов эксперимента определяли переходное электрическое сопротивление в зоне контакта, площадь поверхности схватывания и коэффициент адгезии.

Коэффициент адгезии рассчитывали по формуле как отношение усилия разрыва адгезионного соединения, образовавшегося при схватывании поверхностей, к нормальной нагрузке [7]:

$$K = \frac{F}{N}. \quad (1)$$

Удельную прочность образовавшегося адгезионного соединения – напряжение адгезии – рассчитывали по формуле

$$\sigma_A = \frac{F}{A_r} = \frac{F}{N} H, \quad (2)$$

где F – усилие разрыва соединения; N – нормальная сжимающая нагрузка; A_r – расчетная фактическая площадь контакта; H – твердость при температуре контактирования.

Твердость индентирования исследованных материалов при повышенных температурах измеряли алмазным коническим индентором с углом при вершине 120° согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). Для исследованных материалов значения твердости при температурах эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Твердость исследованных материалов H , МПа, при различных температурах

Материал	Температура, °С				
	20	100	200	300	400
Алюминий	310	260	205	157	110
Медь	800	700	580	463	354
Кадмий	280	95	45	26	–
Титан ВТ20	2 400	1 900	1 300	1 070	950
Латунь Л63	690	650	590	500	480
Сталь 45	1 790	1 740	1 700	1 650	1 610

После разрыва образцов методом планиметрирования по увеличенным фотографиям поверхностей контакта определяли площадь поверхности схватывания, т.е. визуально определяемую область контакта, по которой происходило схватывание поверхностей. Практически эта область близка к контурной площади контакта, на которой группируются пятна фактического контакта. В экспериментах были определены необходимые условия образования адгезионных соединений: температура и контактная нагрузка. Для исследованных металлов они оказались следующими.

Медь. Схватывание медных образцов в статическом контакте начинается при температуре 300 °С, что по гомологической шкале соответствует температуре $\theta = T/T_{пл} = 0,42$. Образовавшиеся после контактирования при 200 °С соединения разваливаются при приложении минимальной разрывающей нагрузки. При более низких температурах не происходит образования адгезионного соединения. На поверхности контакта после его разъединения можно различить три зоны. Поверхность первой покрыта темно-фиолетовой окисной пленкой (цвет пленки меняется в зависимости от ее толщины, на которую влияет температура эксперимента). По этим площадкам контактирование не происходит. Ближе к центру кольца расположена зона, покрытая более тонкой окисной пленкой. Здесь образцы достаточно плотно прилегают друг к другу, что затрудняет окисление контактирующих поверхностей. Однако

схватывания на этих площадках также не происходит. В центре номинальных площадок контактирования располагается третья зона – области схватывания, где группируются фактические площадки контакта, на которых идет образование адгезионного соединения. Эти поверхности имеют цвет свежезачищенной меди, т.е. не покрыты окисными пленками. На образцах, которые испытывались при высоких температурах и контактных нагрузках, когда происходило интенсивное схватывание, в микроскоп наблюдается мелкокристаллическая структура меди на поверхности разрыва соединения.

При нормальных нагрузках 0,5 и 1,0 кН и температуре 300 °С схватывания не происходит, оно начинается при нагрузке 2,5 кН, что соответствует номинальному давлению $p_n = 15$ МПа (3,2 % от твердости меди при этой температуре).

При 400 °С ($\theta = 0,5$) схватывание поверхностей начинается с контактной нагрузки 0,5 кН ($p_n = 3$ МПа, или 0,85 % от твердости при этой температуре).

Прочность адгезионного соединения увеличивается с ростом сжимающей контактной нагрузки при образовании соединения. Зависимость удельного усилия разрыва соединения $\sigma_n = F/A_n$ от нагрузки при температуре 400 °С для медных образцов показана на рис. 2.

Зависимость коэффициента адгезии от величины контактной нагрузки приведена на рис. 3.

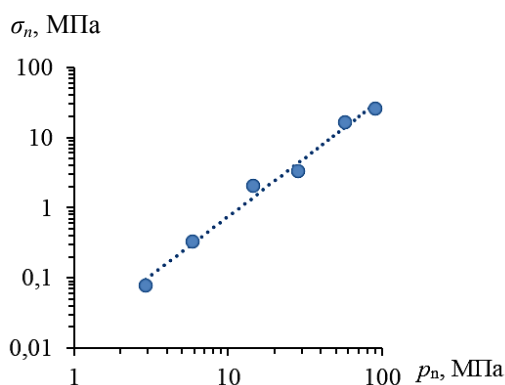


Рис. 2. Зависимость удельного усилия разрыва адгезионного соединения от номинального контактного давления

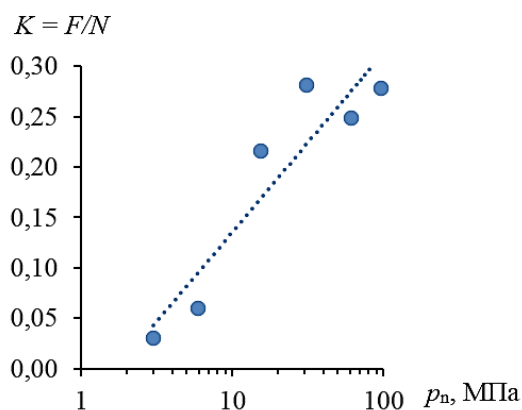


Рис. 3. Зависимость коэффициента адгезии от номинального контактного давления

Как видно из рис. 2 и 3, прочность соединения растет с увеличением усилия сжатия контакта, т.е. контактное давление, как и температура контакта, является фактором, активирующим схватывание поверхностей.

Выразим нагрузку разрушения адгезионного соединения (F) и усилие сжатия (N) через фактическую площадь контакта:

$$F \approx \sigma_n A_r; \quad (3)$$

$$N \approx H A_r, \quad (4)$$

где σ_n – удельное усилие разрыва адгезионного соединения; H – твердость материала.

Твердость, как известно, связана с пределом текучести материала σ_s зависимостью

$$H \approx C \sigma_s, \quad (5)$$

где коэффициент $C \approx 3$.

Таким образом, если предположить, что максимальная прочность адгезионного соединения на фактическом пятне контакта близка к пределу текучести материала в объеме, то, согласно формулам (3)–(5), при развитом пластическом контакте, т.е. при больших контактных нагрузках, значение коэффициента адгезии $K = \frac{F}{N} = \frac{\sigma_n}{H}$ должно стремиться к величине 0,3, что соответствует рис. 3.

Очевидно, увеличению прочности адгезионного соединения способствует увеличение площади контакта, на которой происходит схватывание и которая зависит как от нормальной нагрузки на контакте, так и от изменения твердости материала с температурой. График зависимости площади схватывания от нагрузки для контакта медных образцов в статике при 400 °С приведен на рис. 4.

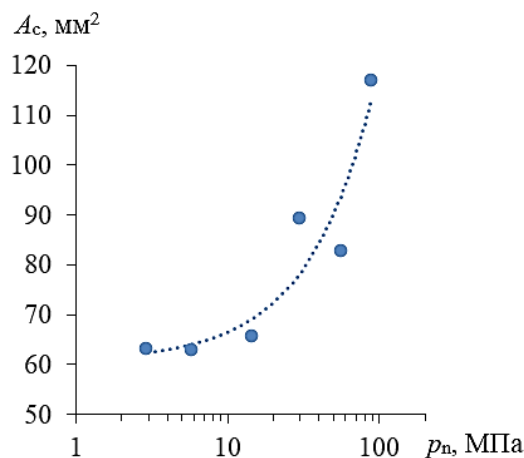


Рис. 4. Зависимость площади схватывания от номинального давления

Зависимость контактного электрического сопротивления от нагрузки адгезионного соединения, полученного в экспериментах при температурах контакта 300 и 400 °С, показана на рис. 5. Несмотря на то, что между контактным электросопротивлением и фактической площадью контакта нет прямой пропорциональности, очевидно, что большей величине площади контакта соответствует меньшая величина электросопротивления. Таким образом, рис. 5 подтверждает увеличение площади адгезии с ростом температуры.

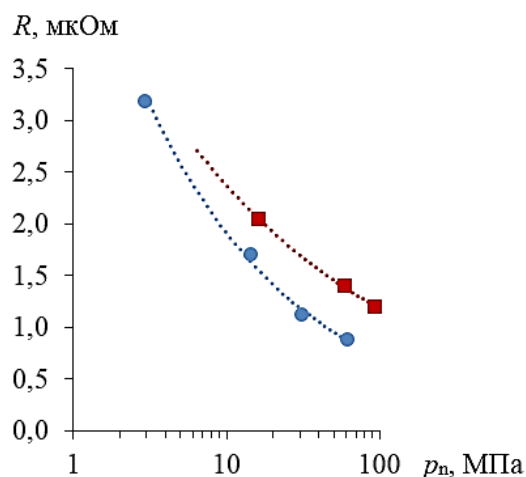


Рис. 5. Зависимость контактного электрического сопротивления от номинального давления: верхняя линия – температура 300 °С; нижняя – 400 °С; материал образцов – медь

Алюминий. Алюминиевые образцы при контактировании не схватываются до температуры 400 °С, что соответствует температуре по гомологической шкале $\theta = 0,72$. При указанной температуре схватывание начинается с нагрузки 1 кН, что соответствует номинальному давлению 6 МПа (5,5 % от твердости). При этом коэффициент адгезии достаточно мал и равен 0,01...0,02 даже при площади схватывания, практически равной номинальной площади контакта. Невысокая адгезия поверхностей при развитой площади контактирования объясняется наличием на контактных поверхностях окисных пленок, препятствующих образованию пятен металлического контакта. Это предположение подтверждается высокими значениями контактного электрического сопротивления – порядка 0,3...1,5 мОм.

В исследованном интервале температур и нагрузок при статическом контактировании не наблюдалось схватывания стальных, латунных и титановых образцов. Данный факт связан с высокой твердостью указанных материалов, слабой ее зависимостью от температуры в исследованном интервале температур и, соответственно, с неразвитостью пластических деформаций в зоне контакта. Эти результаты согласуются с современными взглядами на механизм образования адгезионных соединений в контакте металлов [7, 8]. Схватыванию титановых образцов, кроме того, препятствуют прочные окисные пленки на поверхности металла, не разрушающиеся при статическом контакте.

Исследование схватывания металлов при сдвиге контакта

Относительный сдвиг образцов является фактором, интенсифицирующим схватывание в контакте металлических материалов. Причины могут быть следующие: развитие пластической деформации и увеличение площади фактического контакта; разрушение окисных пленок и увеличение относительной доли чисто металлического контакта на пятнах фактического контакта; снижение энергетического барьера схватывания при действии касательных напряжений.

Как и в случае статического контакта, на поверхности контактирования можно выделить три зоны. Две зоны – сильно и слабо окисленные – в случае сдвига аналогичны подобным зонам при статическом контакте, однако их границы менее выражены. В третьей зоне отчетливо наблюдаются следы схватывания. Под микроскопом хорошо видны вырывы и следы переноса материала.

Относительный сдвиг поверхностей влияет как на порог схватывания, так и на величину коэффициента адгезии при данных температуре и нагрузке. Значения температур и нагрузок, при которых начинается схватывание, снижаются, а коэффициенты адгезии увеличиваются. Во время сдвига также происходит схватывание материалов, адгезионное соединение которых отсутствовало при статическом контакте.

Схватывание медных образцов при сдвиге начинается в условиях комнатной температуры, однако не во всех экспериментах, так что разброс данных в этом случае большой. Интенсивное разрушение окисных пленок на поверхности алюминиевых образцов ведет к началу схватывания уже при температурах 20...100 °С. Схватывание более твердых материалов – титана и стали 45 – начинается при 200 °С. Латунь схватывается при 400 °С.

Зависимости усилия разрыва соединения от температуры контакта для исследованных материалов приведены на рис. 6.

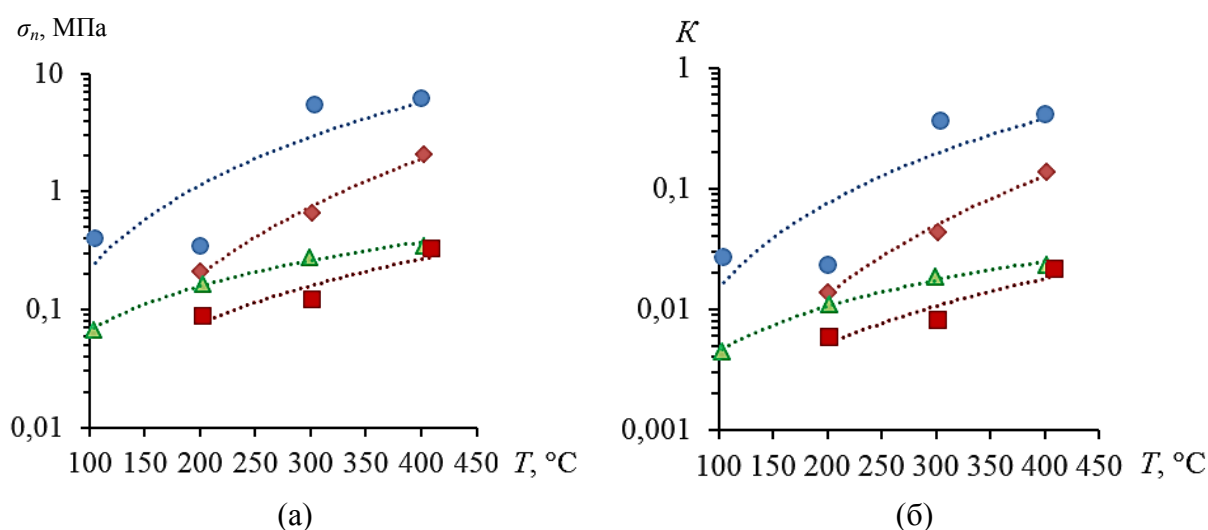


Рис. 6. Зависимость прочности адгезионного соединения (а) и коэффициента адгезии (б) от температуры при сдвиге поверхностей:
 ● – медь; ◆ – титан; ▲ – алюминий; ■ – сталь 45

При одних и тех же температуре и нагрузке наибольшей склонностью к схватыванию отличается медь, наименьшей – сталь 45. Схватывание образцов из кадмия не происходит ни при статическом контакте, ни при сдвиге, несмотря на невысокую твердость этого металла, а следовательно, и большую площадь фактического касания при контактировании. Это подтверждает теоретические представления [7], согласно которым металлы с гранцентрированной плотноупакованной решеткой имеют меньшую склонность к схватыванию.

Многочисленные исследования процессов адгезии и схватывания металлов свидетельствуют об их термически активируемом характере. В частности, одним из механизмов адгезии считается диффузионный. В связи с этим рассмотрим зависимость адгезионной прочности металлического контакта от температуры. В координатах $\ln\sigma_A - 1/T$ данная зависимость имеет вид прямой, наклон которой характеризует энергию активации процесса (рис. 7). Определенные на основании данных рис. 7 значения энергии активации E_A для трех металлов приведены в табл. 2. Эти значения существенно меньше, чем у энергии активации самодиффузии, типичные значения которой равны 15...20 $RT_{пл}$, и наиболее близки к энергии поверхностной диффузии E_s ,

типичные значения которой (в зависимости от механизма диффузии) равны $4...6 RT_{пл}$ [10]. Согласно работе [11], энергия активации поверхностной диффузии составляет 5...20 % от теплоты адсорбции. Если принять, что типичная теплота химической адсорбции 1...10 эВ, то величина энергии активации поверхностной диффузии $E_s = 0,05...2$ эВ, что соответствует примерно 5...200 кДж/моль.

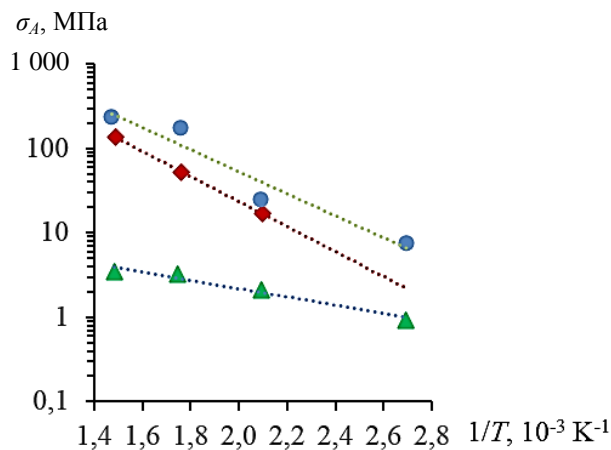


Рис. 7. Зависимость напряжения адгезии от обратной температуры:
● – медь; ◆ – титан; ▲ – алюминий

Таблица 2. Значения энергии активации, кДж/моль

Металл	Адгезия (эксперимент)	Поверхностная диффузия [11]
Алюминий	9,5	≈ 46
Титан	28,0	–
Медь	28,3	30...80

На рис. 8 приведены значения контактного электросопротивления разгруженного контакта образцов в зависимости от фактической площади контакта как для статического контакта, так и для контакта при сдвиге образцов. Фактическую площадь рассчитывали по формуле (4) для пластического контакта, используя экспериментальные значения нагрузок сдавливания образцов и твердости при температуре схватывания. Весь массив экспериментальных данных хорошо описывается единой степенной аппроксимирующей зависимостью (показана пунктиром на рис. 8) при высоком значении коэффициента корреляции $R = 0,94$ на уровне значимости $p < 10^{-4}$. Таким образом, величина контактного электросопротивления может служить косвенным индикатором как абсолютных значений, так и изменения фактической площади контакта, несмотря на то, что контактное электросопротивление определяется не суммой площадей пятен фактического контакта A_r , а их суммарным периметром [12]. Эксперименты показали также тесную отрицательную корреляционную связь между контактным электросопротивлением и коэффициентом адгезии с коэффициентом корреляции $R = 0,85$ на уровне значимости $p < 0,01$.

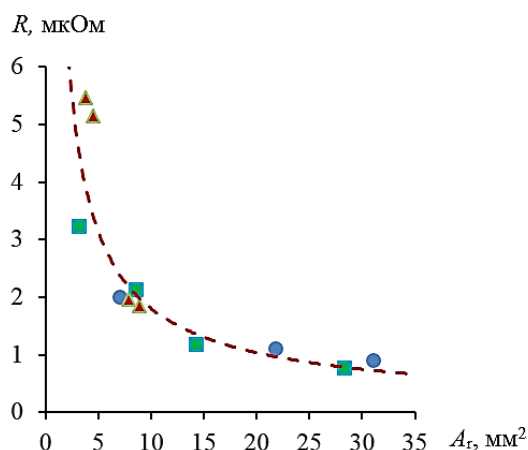


Рис. 8. Зависимость контактного электросопротивления от фактической площади контакта:
 ● – медь, 300 °С; ■ – медь, 400 °С; ▲ – медь при сдвиге;
 пунктир – обобщенная корреляционная зависимость

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае контакта металлических (не ювенильных) поверхностей на воздухе основным фактором, влияющим на прочность адгезионного соединения в статическом контакте металлических деталей и при их относительном сдвиге, является состояние их поверхностей, а именно наличие и прочность оксидных и других пленок. Необходимое условие образования адгезионного соединения – пластическая деформация неровностей шероховатости контактирующих поверхностей, которая не только обеспечивает разрушение поверхностных пленок, но и способствует формированию достаточно большой площади фактического контакта деталей. Следствием этого условия является влияние температуры, твердости материалов контактирующих деталей и нагрузки формирования адгезионного соединения. При упругом характере деформации шероховатого слоя поверхностные пленки не разрушаются, что исключает образование в контакте прочных металлических связей, а слабые ван-дер-ваальсовы связи будут разрушены при упругом восстановлении материала после снятия контактной нагрузки. Имеет значение также кристаллическое строение металлов контактирующих деталей, от которого зависит степень согласованности (или разориентации) кристаллических решеток контактирующих металлов [13].

Качественным индикатором наличия и степени разрушения поверхностных пленок в контакте является контактное электросопротивление. Результаты экспериментов показали тесную корреляцию контактного сопротивления с коэффициентом адгезии. Достоинства контактного электросопротивления как диагностического инструмента: его относительная доступность, простота регистрации и обработки выходной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adhesive Bonding / W. Brockmann [et al.]. Weinheim: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA. 2005. 414 p.
2. Handbook of Adhesion Technology / ed. by L.F.M. da Silva, A. Öchsner, R. Adams. Springer International Publishing AG. 2018. 1806 p.
3. Handbook of Adhesive Technology / ed. by A. Pizzi, K.L. Mittal. Boca Raton: CRC Press. 2018. 644 p.

4. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О ДМТ-модели дискретного адгезионного контакта // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 5–15.
6. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука. 1973. 280 с.
7. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение. 1986. 359 с.
8. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. М.: Наука. 1972. 160 с.
9. The mechanics of adhesion / ed. by D.A. Dillard, A.V. Pocius. Amsterdam e.a.: Elsevier. 2002. 790 p.
10. Antczak G., Ehrlich G. Surface Diffusion: Metals, Metal Atoms, and Clusters. Cambridge e.a.: Cambridge University Press. 2010. 758 p.
11. Введение в физику поверхности / К. Оура [и др.]. М.: Наука. 2006. 490 с.
12. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
13. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения. Минск: Университетское. 1991. 396 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Митюрёв А.А. Исследование контакта конструкционных металлов в условиях схватывания при повышенных температурах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 14–24.

STUDYING THE CONTACT OF CONSTRUCTIONAL METALS UNDER THE CONDITIONS OF SEIZURE AT ELEVATED TEMPERATURES

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc., A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The conditions for the occurrence of seizure of metal surfaces under static contact and shear are studied. The effect of mechanical load and elevated temperatures on the process of formation of an adhesive joint in a contact has been studied. The description of experimental device and experimental technique is given. Quantitative values of the strength of adhesive joints are obtained and a theoretical analysis of the obtained dependences is carried out. It is shown that the shear of the contacting surfaces affects both the “seizure threshold” and the value of the adhesion coefficient at a given temperature and load. At that the values of temperatures and loads of seizure begining decrease, and the adhesion coefficients increase.

Keywords: metal contact, adhesion, seizure, temperature, contact area, contact electrical resistance.

Поступила в редакцию/received: 27.02.2023; после рецензирования/ revised: 23.03.2023;
принята/accepted: 15.04.2023

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2023

Магнитожидкостные уплотнения для герметизации газовых сред нашли широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своим неоспоримым преимуществам. Тем не менее такие уплотнения пока не способны надежно герметизировать жидкие среды с различной полярностью. В работе проанализированы физико-химические процессы, которые приводят к разрушению магнитной жидкости в уплотнении под воздействием контактирующей с ней жидкой средой. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса герметизации, базирующегося на использовании магнитных жидкостей на основе силоксанов и триэтанолamina, а также немагнитных жидкостей с различной полярностью. Сделан вывод, что для герметизации полярных жидких сред представляется перспективным использовать олеофобные магнитные жидкости, содержащие в большом количестве наполнитель в виде сильномагнитных частиц с дисперсностью 0,1...1 мкм. Показана необходимость того, чтобы магнитная жидкость имела как можно меньшую площадь контакта с герметизируемой жидкостью и сохраняла ламинарный режим течения.

Ключевые слова: магнитная жидкость, уплотнение, жидкая среда.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-25-32

ВВЕДЕНИЕ

Новый функциональный материал – магнитные жидкости – нашел широкое применение в технических устройствах, таких как разнообразные датчики механических величин, демпферы, магнитные подшипники [1–3]. В настоящее время для работы в газовых средах часто используют магнитожидкостные уплотнения (МЖУ) [4, 5]. Герметизация в них осуществляется «пробкой» из магнитной жидкости, удерживаемой магнитным полем. Очевидные преимущества МЖУ перед сальниками и резиновыми манжетами – долговечность, лучшая герметизирующая способность, отсутствие физического контакта с валом (отсутствие износа поверхностей), низкие потери энергии на внутреннее трение, простота обслуживания и значительное увеличение межремонтного периода. К недостаткам МЖУ следует отнести ограниченность рабочего температурного диапазона, а также проблемы, связанные с разрушением коллоидной структуры магнитной жидкости в сильных магнитных полях, испарение дисперсионной среды и высокий момент страгивания.

При использовании МЖУ можно осуществить герметизацию жидких сред, но практическая реализация этой задачи очень сложная [6–11] и в настоящий момент находится на стадии решения. Главным образом трудности связаны с быстрым разрушением магнитной герметизирующей среды в процессе работы уплотнения, со снижением величины пробивного давления, а также с недостаточным пониманием теоретических вопросов взаимодействия магнитной жидкости с герметизируемой средой.

Задача исследований заключалась в теоретическом анализе разрушения магнитной жидкости под действием герметизируемой жидкости и в экспериментальном поиске подходов к увеличению долговечности МЖУ, работающих в контакте с жидкой средой.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОНТАКТЕ МАГНИТНОЙ И НЕМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЕЙ

Проанализируем основные причины, приводящие к разрушению магнито-жидкостной «пробки» под действием омывающей ее жидкой среды, и на основании этого выявим требования к составу магнитной жидкости и конструкции уплотнения. Наиболее очевидной причиной потери герметичности МЖУ является размывание магнитной жидкости герметизируемой средой из-за их взаимной растворимости. Поэтому магнитная жидкость должна очень слабо растворяться в уплотняемой жидкости и не вступать с ней в химическое взаимодействие.

Взаимная растворимость жидкостей определяется соотношением энергий взаимодействия однородных и разнородных компонентов раствора. Если преобладающей является энергия взаимодействия одинаковых молекул, растворимость обычно невелика. Как правило, плохо растворяются друг в друге разнородные по физико-химическим свойствам вещества. Качественно предсказать растворимость неэлектролитов можно на основании теории Дж. Гильдебранда, согласно которой растворимость веществ уменьшается и с увеличением разности их параметров растворимости: $\rho = (E / V)^{0,5}$, где E , V – удельная энергия испарения и мольный объем компонента соответственно. С примерами расчета параметра растворимости можно ознакомиться в справочнике под редакцией В.Б. Коган [13].

Эмпирическим способом установлено, что взаимная растворимость жидкостей чаще всего уменьшается с увеличением разности дипольных моментов их молекул. Если учитывать, что основной вклад в поляризацию жидких диэлектриков вносит ориентационная поляризация, об их растворимости можно качественно судить по диэлектрической проницаемости, которая легко определяется экспериментально.

В общем случае процесс растворения может протекать самопроизвольно, если изменение свободной энергии отрицательное: $\Delta G \sim \Delta H - T\Delta S$, где H – энтальпия, T – температура, S – энтропия. В рассматриваемых системах веществ, слабо изменяющих свой объем, $\Delta U \sim \Delta H$, где U – внутренняя энергия.

Для магнитных жидкостей часть внутренней энергии обусловлена магнитным диполь-дипольным взаимодействием частиц U_d . Если магнитная жидкость находится в однородном магнитном поле, то в процессе ее разбавления в основном будет происходить изменение расстояния между цепочками частиц, а расстояние между частицами в цепочке будет изменяться незначительно. Это объясняется действием сил отталкивания между цепочками. В результате при растворении инородных молекул изменение энергии магнито-статического взаимодействия будет $\Delta U_d < 0$, что приведет к снижению ΔU всей системы.

Число микросостояний частиц при растворении почти не изменится из-за того, что внешнее магнитное поле по-прежнему будет ограничивать их подвижность. Поэтому магнитное взаимодействие практически не влияет на величину энтропийного фактора $T\Delta S$. Из сказанного выше вытекает, что во внешнем однородном магнитном поле вероятность образования раствора может несколько увеличиваться.

По-другому растворение будет протекать в неоднородном магнитном поле. Различие магнитной энергии частиц в разных частях объема приводит к их перераспределению в соответствии с законом Больцмана. При разбавлении произойдет

увеличение магнитной энергии взаимодействия частиц U_d за счет того, что частицы вынуждены будут перейти в область с меньшей напряженностью магнитного поля. Это приведет к увеличению ΔU системы, а следовательно, к снижению вероятности образования раствора.

Однако даже если уплотняющая магнитная жидкость и уплотняемая жидкость взаимно нерастворимы, существует опасность нарушения герметизации из-за поверхностного разрушения магнитной жидкости. На наш взгляд, возможны два механизма такого разрушения. Первый проявляется тогда, когда энергия адгезии магнитной жидкости к уплотняемой жидкости выше энергии когезии магнитной жидкости. При этом условии энергетически выгодно образование на межфазной поверхности «растворитель – газ» пленки из магнитной жидкости. Оно приведет к тому, что циркулирующая уплотняющая жидкость постепенно размочит магнитную жидкость в уплотнении. Вероятность этого процесса тем выше, чем больше разность между поверхностным натяжением контактирующих жидкостей.

При перемещении магнитной жидкости во внешнее однородное магнитное поле на дисперсные частицы действует магнитный момент, стремящийся ориентировать их так, чтобы вектор намагниченности совпадал с направлением силовых линий. В структурированной подобным образом магнитной жидкости взаимодействие между частицами значительно выше, чем в изотропной, в которой магнитные моменты частиц разбросаны хаотично тепловым движением. Отсюда следует, что в магнитном поле энергия когезии у магнитной жидкости будет другой. В зависимости от ориентации поля по отношению к воображаемой поверхности разрыва когезия может быть как выше, чем без поля, так и ниже. При нормальной ориентации поля работа когезии выше, а при тангенциальной – ниже. Следует добавить, что некоторое воздействие магнитного поля происходит за счет изменения межмолекулярного взаимодействия [12, 13].

Для магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле (например, в уплотнении), пленочное разрушение затруднено также действием объемных магнитных сил, которые как бы увеличивают некоторую эффективную работу когезии.

Другой механизм разрушения уплотняющей магнитной жидкости может быть обусловлен образованием эмульсии из взаимонерастворимых уплотняемой жидкости и уплотняющей магнитной жидкости. Устойчивость эмульсий, а значит, и вероятность их образования зависят от величины межфазного поверхностного натяжения: чем оно меньше, тем выше устойчивость. Для снижения межфазного поверхностного натяжения используют эмульгирующие агенты, роль которых вполне могут играть ПАВ или дисперсные частицы, содержащиеся в магнитной жидкости.

Эмульгирование начинается после того, как течение жидкости перестает быть ламинарным и становится турбулентным. Возникающая при этом гидродинамическая неустойчивость поверхности магнитной жидкости сопровождается отрывом ее частиц и их уносом герметизируемой жидкостью. Скорость процесса эмульгирования зависит от следующих безразмерных критериев:

$$P_l / P_{lm}; H_l / H_{lm},$$

где P_l , H_l и P_{lm} , H_{lm} – плотность и вязкость соответственно магнитной жидкости и уплотняемой.

Плотность магнитной жидкости принимается равной условному значению, т.е.

$$P_{lm} = P_{o_{lm}} + F_{lm} / g,$$

где $P_{o_{lm}}$ – плотность магнитной жидкости как сложного вещества; F_{lm} – сила, действующая на единичный объем магнитной жидкости в магнитном поле уплотнения; g – ускорение силы тяжести.

В свою очередь:

$$F_{lm} \sim JH_m,$$

где J – намагниченность магнитной жидкости; H_m – максимальное поле в герметизируемом зазоре.

С уменьшением значения приведенных критериев снижается вероятность эмульгирования магнитной жидкости. Поэтому следует стремиться к повышению вязкости магнитной жидкости, ее плотности и намагниченности. Процесс эмульгирования, разумеется, зависит от конкретной конструкции уплотнения и от размеров последнего. Конструкция уплотнения должна быть такой, чтобы была минимальная площадь контакта магнитной жидкости с уплотняющей средой. Кроме того, геометрия уплотняемого зазора должна способствовать сохранению ламинарного течения жидкостей в широком диапазоне скоростей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально изучалась герметизирующая способность модернизированного радиального магнитоожидкостного подшипника скольжения [14–16]. Под этим понималась способность подшипника нормально работать в контакте с какой-либо жидкой средой и не пропускать ее через себя вдоль вала. Схема опытного подшипника и установки, на которой проводились эксперименты, показана на рисунке. Подшипниковый узел размещен в немагнитном корпусе 1 на станине 2. Корпус 1 подшипникового узла установлен на подшипник качения 12 и поэтому может вращаться относительно основания 2 для измерения момента трения M_T в магнитоожидкостном подшипнике скольжения и в уплотнении. Магнитоожидкостный подшипник состоит из магнитопровода 3, кольцевого постоянного магнита 4, магнитопровода с зубцами 5 (магнитоожидкостное уплотнение) и втулки 6 из бронзы. Нижний конец вала 8 из стали 45 закреплен во внутреннем кольце шарикоподшипника 9. Верхний конец вала соединен через муфту с электродвигателем. Герметизируемая жидкость размещается в рабочем объеме 10 корпуса 2 и сообщается с резервуаром 11, установленным на некоторой высоте для создания повышенного давления посредством трубопровода 14.

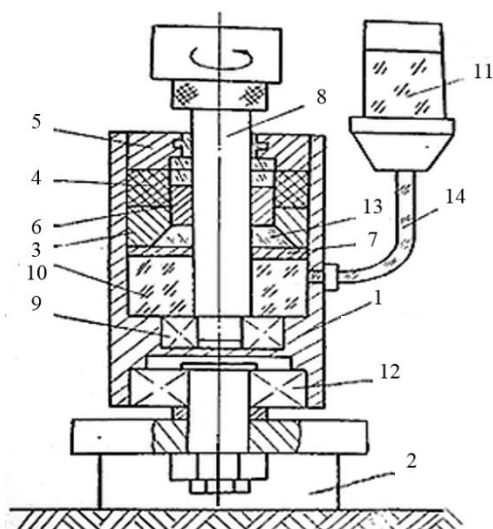


Схема экспериментальной установки

В приведенной конструкции подшипника (см. рисунок) магнитная жидкость непосредственно контактирует с герметизируемой жидкостью. Для уменьшения

площади контакта между магнитной и немагнитной жидкостями предусмотрено следующее конструктивное решение. К торцу магнитопровода 3 крепится немагнитная шайба 7. Между шайбой 7 и вращающимся валом 8 имеется минимально возможный зазор (менее 0,1 мм). Магнитное масло заполняет рабочий объем подшипникового узла и область 13 между магнитопроводом 3 и шайбой 7. Это снижает вероятность эмульгирования и скорость протекания диффузионных процессов взаимопроникновения жидкостей.

Магнитопровод с зубцами создает сильное магнитное поле в зазоре, отделяющем его от вала. Магнитная жидкость (масло), заполняющее зазор, компенсирует повышенное давление со стороны герметизируемой жидкости (по существу, магнитопровод, вал и магнитная жидкость составляют магнитожидкостные уплотнения).

В некоторых опытах испытывался подшипник, показанный на рисунке, в перевернутом виде, т.е. подшипник, в котором к герметизируемой жидкости был обращен магнитопровод 5. Вал, проходящий через подшипник, имел диаметр 14 мм, длина втулки равнялась диаметру вала, относительный зазор между валом и втулкой – $2 \cdot 10^{-3}$, а напряженность поля в этом месте составляла около $1,6 \cdot 10^5$ А/м. Зазор между зубцами и валом 0,2 мм, толщина зубцов 0,5 мм. Испытания проводили при скорости вращения вала 1 000 об/мин.

После периода приработки подшипника фиксировалось стабильное значение момента трения. Затем в рабочий объем 10 (см. рисунок) заливали жидкость и продолжали дальнейшие испытания. О проникновении жидкости судили по изменению момента трения, уровню жидкости в прозрачном резервуаре 11 и протеканию жидкости через зубцы магнитопровода 5. Испытания продолжали в течение 200 часов, если герметичность подшипника не нарушалась раньше.

Изучалась работа магнитожидкостного подшипника в контакте со слабополярными жидкостями: приборным маслом МВП, вазелиновым маслом и с сильно полярной жидкостью – водой.

Слабополярные жидкости имеют диэлектрическую проницаемость, составляющую менее 2...3, и поверхностное натяжение около 20...30 эрг/см². Для герметизации таких жидкостей была выбрана магнитная жидкость ММ-ТЭА с дисперсионной средой из триэтаноламина, который практически нерастворим в указанных углеводородных слабополярных жидкостях, имеет гораздо более высокое значение диэлектрической проницаемости (~110), а поверхностное натяжение приблизительно такое же. Если исходить из установленных механизмов разрушения герметизирующей магнитной жидкости, перечисленные свойства жидкости ММ-ТЭА позволяют выделить ее из ряда других.

Для герметизации воды были выбраны магнитные жидкости, содержащие в качестве основы силоксановые жидкости, которые не смешиваются с водой и являются гидрофобными (таблица).

Магнитные жидкости и их свойства

Магнитная жидкость	Дисперсионная среда	Вязкость, Па·с	Намагниченность, кА/м
ММ-ПЭС1	ПЭС-5	4,6	21
ММ-ФМ	ФМ-6	2,4	38
ММ-ПЭС2	ПЭС-5	15	195
ММ-ТЭА	ТЭА	1,2	31

Жидкость ММ-ПЭС1 (см. таблицу) отличается от ММ-ПЭС2 наличием в составе мелкодисперсного магнитного наполнителя, существенно повышающего ее намагниченность и вязкость. (Строго говоря, это не совсем магнитная жидкость, а скорее коллоидная система, напоминающая магнитореологическую жидкость.) Выбранные магнитные жидкости из-за высокой вязкости могут использоваться для смазки подшипников лишь в исключительных случаях. В связи с этим ими заполняли лишь уплотняющий зазор между валом и магнитопроводом с зубцами, а подшипник смазывали маловязкой магнитной жидкостью на основе ПЭС-В-2. Подшипник разворачивали так, чтобы уплотняющая магнитная жидкость была обращена в сторону воды. Около магнитопровода 5 (см. рисунок) устанавливалась такая же шайба, как и шайба 7. Для исключения перемешивания уплотняющей и смазочной жидкостей в подшипнике была установлена специальная перегородка. Как было ранее указано, испытания проводились при условиях, когда подшипник находился в контакте с ограниченным объемом непроточной жидкости. Когда герметизировалась вода, испытания проводились также при непрерывном протекании ее около подшипника. Для этого резервуар 11 подключался к водопроводной сети, а в полости 10 проделывалось сливное отверстие. Давление циркулирующей воды на подшипник не превышало 20 кПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Установлено, что магнитная жидкость ММ-ТЭА на основе триэтанолamina достаточно надежно герметизирует подшипник от проникновения слабополярных жидкостей при избыточном давлении 10 кПа и ниже.

Никаких объективных данных о снижении герметичности подшипника к концу испытаний получено не было. Сравнение ИК-спектров поглощения чистого вазелинового масла и проработавшего в контакте с магнитной жидкостью показало, что в последнем содержится незначительное количество триэтанолamina – около 10^{-2} %. Эта концентрация триэтанолamina, по-видимому, близка к предельной, поскольку в контакте с магнитной жидкостью находилось вазелиновое масло, превышающее ее по объему только в 10 раз.

При работе в непроточной воде с избыточным давлением 20 кПа все приведенные в таблице магнитные жидкости обеспечивали герметизацию в течение 200-часового цикла испытаний. Однако к концу испытаний в магнитных жидкостях ММ-ПЭС1 и ММ-ФМ происходили существенные необратимые изменения: увеличивалась вязкость, снижалась намагниченность. В проточной воде герметичность подшипника с этими жидкостями нарушается через несколько десятков часов. Негативное влияние воды на структуру указанных магнитных жидкостей не позволяет рекомендовать их для практического применения. Тем не менее вполне может быть, что если стабилизировать эти магнитные жидкости другим ПАВ (не на основе жирных кислот), то результат будет иным.

Магнитная жидкость ММ-ПЭС2 успешно выдержала все испытания, включая испытания в проточной воде при давлении 0,1 МПа. В процессе работы из магнитной жидкости вымывалась небольшая часть дисперсионной среды, других заметных изменений структуры не происходило. Более продолжительные испытания показали, что вымывание оставшейся части дисперсионной среды прекращается или существенно замедляется [17].

Недостатком магнитной жидкости ММ-ПЭС2 является ее высокая вязкость, особенно в магнитном поле. Поэтому уплотнения с этой жидкостью могут перегреваться из-за диссипативных потерь энергии на трение. Кроме того, наблюдается

аномально большой пусковой момент трения в уплотнениях с жидкостью ММ-ПЭС2, который является проявлением ее тиксотропной структуры.

Хорошая герметизирующая способность магнитной жидкости ММ-ПЭС2 объясняется ее особой структурой. Частицы супермелкого магнита совместно с более крупными частицами магнитного наполнителя образуют плотную упаковку с незначительной пористостью. Поры заполняются молекулами ПАВ-стабилизатора и дисперсионной среды. Герметизируемая вода не в состоянии разрушить магнитную жидкость механически из-за наличия в ней прочного каркаса из магнитных частиц. Вода может проникать через магнитную жидкость только по порам, но для этого требуется очень высокое давление. Не обязательно даже, чтобы поры были чем-либо заполнены, достаточно, чтобы стенки пор (частиц) были гидрофобны.

ВЫВОД

Таким образом, в настоящей работе была показана достаточно высокая герметизирующая способность магнитной жидкости ММ-ТЭА при контакте со слабополярными жидкими средами. Для герметизации полярных жидких сред представляется перспективным использовать олеофобные магнитные жидкости, содержащие в большом количестве наполнитель в виде магнитных частиц с дисперсностью, которая на 1...2 порядка более низкая, чем у частиц магнетита жидкости. Следует также обращать внимание на то, чтобы магнитная жидкость имела как можно меньшую площадь контакта с герметизируемой жидкостью и сохраняла ламинарный режим течения. Полученные результаты нашли практическое воплощение в конструкции магнитного шпиндельного узла для химического гомогенизатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов [и др.]. М.: Машиностроение. 1993. 272 с.
2. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйш. шк. 1988. 184 с.
3. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2019. 164 с.
4. Сайкин М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования. СПб.: Лань. 2017. 136 с.
5. Kole M., Khandekar S. Engineering applications of ferrofluids: A review // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. V. 537. P. 168222.
6. Федоров О.Л. Оценка ресурса магнитожидкостных уплотнений, контактирующих с жидкими средами // *XX юбилейная Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: Сборник научных трудов*. Иваново: ИГЭУ. 2022. С. 277–287.
7. Орлов Д.В., Федоров О.Л., Скроботова Т.В. Экспериментальное исследование ресурса магнитожидкостных уплотнений при герметизации жидких сред // *Магнитная гидродинамика*. 1989. № 4. С. 127–130.
8. Influence of viscosity and magnetoviscous effect on the performance of a magnetic fluid seal in a water environment / Z. Li [et al.] // *Tribology Transactions*. 2018. V. 61. № 2. P. 367–375.
9. The pressure loading process among stages of magnetic fluid seal in aqueous environment / Z. Wang [et al.] // *Tribology transactions*. 2019. V. 62. № 4. P. 650–657.
10. Matuszewski L., Szydło Z. Endurance testing of a rotating single-stage magnetic fluid seal for shipbuilding // *Polish Marine Research*. 2011. V. 18. № 2. P. 51–59.

11. Liu T., Cheng Y., Yang Z. Design optimization of seal structure for sealing liquid by magnetic fluids // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2005. V. 289. P. 411–414.
12. Зенгуил Э. Физика поверхности / пер. с англ. М.: Мир. 1990. 536 с.
13. Коган В.Б., Огородников С.К., Кафаров В.В. Справочник по растворимости. В 3 т. Л.: Академия наук СССР. 1970. Т. 1. 960 с.
14. Болотов А.Н. Триботехника магнитопассивных и магнитожидкостных подшипниковых опор скольжения. Дисс... докт. техн. наук. Москва. 1993. 555 с.
15. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Journal of Friction and Wear*. 2004. V. 25. № 3. P. 286–291.
16. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
17. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Энергетические свойства поверхностей, смазанных магнитной наносмазкой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 15–22.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Герметизация с помощью магнитных жидкостей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 25–32.

SEALING WITH MAGNETIC FLUIDS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

Magnetofluidic seals for sealing gas media have found wide application in various industries due to their undeniable advantages. Nevertheless, such seals are not yet able to reliably seal liquid media with different polarities. The paper analyzes the physico-chemical processes that lead to the destruction of the magnetic fluid in the seal under the influence of the liquid medium in contact with it. The results of experimental studies of the sealing process based on the use of magnetic liquids based on siloxanes and triethanolamine, as well as non-magnetic liquids with different polarities are presented. It is concluded that for sealing polar liquid media, it seems promising to use oleophobic magnetic liquids containing a large amount of filler in the form of strong magnetic particles with a dispersion of 0.1...1 microns. It is shown that the magnetic fluid must have the smallest possible contact area with the sealed liquid and maintain the laminar flow regime.

Keywords: magnetic fluid, seal, liquid medium.

Поступила в редакцию/received: 31.03.2023; после рецензирования/revised: 14.04.2023;
принята/accepted: 21.04.2023

К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ РЕСУРСА ФРИКЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО ИЗНОСА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2023

Предложены аналитические зависимости для прогнозирования износа деталей с покрытием, твердость которого отличается от твердости основного материала. Для описания зависимости твердости материала от расстояния до поверхности трения использована формула, полученная с помощью энергетического метода оценки усилия внедрения индентора в пластический материал. В основу расчета ресурса узла трения по критерию износа положено известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда, обобщенное на случай нелинейной (степенной) зависимости интенсивности изнашивания от твердости изнашиваемого материала и приложенной нормальной нагрузки. Показано, что в этом случае игнорирование градиента твердости при оценке ресурса узла трения приводит к еще более существенной погрешности, чем в случае линейной зависимости интенсивности изнашивания от твердости. В зависимости от соотношения твердостей покрытия и подложки оценка ресурса узла трения оказывается либо завышенной, либо заниженной, что негативно влияет на надежность и эффективность оборудования. В первом случае возрастает вероятность возникновения отказа, во втором случае часть ресурса остается неиспользованной.

Ключевые слова: трение, изнашивание, покрытие, твердость, ресурс, прогнозирование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-33-39

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что более 80 % отказов современных технических устройств обусловлены износом деталей, поэтому еще на стадии проектирования необходимо прогнозировать технический ресурс узлов трения [1]. В процессе эксплуатации может возникнуть необходимость уточнить первоначальный прогноз и оценить остаточный ресурс узла. В любом случае критерием предельного состояния узла трения является предельно допустимый износ [1]. Для оценки ресурса изделия по критерию предельно допустимого износа необходимо использовать аналитические зависимости, выражающие величины линейного, объемного или массового износа как функции времени или пути трения. Кроме того, эти зависимости должны содержать параметры фрикционного соединения, влияющие на величину износа: нормальную нагрузку или давление, прочностные характеристики материалов трущихся деталей, параметры окружающей среды и т.п.

Одной из зависимостей, описывающих динамику процесса изнашивания, является известное уравнение Арчарда (или Хольма – Арчарда) [2–6]:

$$V = K \frac{N}{H} L, \quad (1)$$

где V – объем изношенного материала; K – коэффициент износа; N – нормальная нагрузка; H – твердость (микротвердость) более мягкого материала пары трения; L – путь трения.

В уравнении (1) твердость обычно считается величиной постоянной, т.е. не зависящей от пути трения. Между тем в узлах трения очень часто используются детали с переменной по глубине твердостью, т.е. фактически твердость является функцией пути трения. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете величины износа и в конечном счете при оценке ресурса узла трения.

В статье [7] предложена аналитическая зависимость для прогнозирования ресурса фрикционного соединения деталей с градиентом твердости по глубине по критерию предельно допустимого износа. При этом, как и в уравнении (1), величина износа считается прямо пропорциональной нормальной нагрузке N и обратно пропорциональной твердости материала H , что является некоторым допущением.

Целью настоящей работы является обобщение уравнения (1) на случай более сложной нелинейной зависимости величины износа от указанных параметров (N и H) при переменной твердости материала изнашиваемых деталей по глубине.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Прямая пропорциональность интенсивности изнашивания величине нормальной нагрузки и обратная пропорциональность твердости материала (или аналогичной прочностной характеристике) подтверждается многими экспериментальными исследованиями. Однако также немалое число экспериментальных работ свидетельствует о более сложном (чаще всего степенном) характере взаимозависимости указанных выше параметров. Для аналитического описания этих зависимостей Ю.Н. Дроздов предложил выражать их с помощью безразмерных комплексов (критериев) [8]. В случае преобладания механического разрушения поверхностей трения интенсивность изнашивания определяется набором критериев, т.е.

$$I_h = F(\Phi_a, \Phi_{cm}, \Phi_y, \Phi_{ш}), \quad (2)$$

где I_h – линейная интенсивность изнашивания; Φ_a – комплекс, характеризующий напряженное состояние контакта; Φ_{cm} – комплекс, характеризующий толщину смазочного слоя в контакте; Φ_y – комплекс, характеризующий усталостную прочность материалов трущихся деталей; $\Phi_{ш}$ – комплекс, характеризующий влияние шероховатости на изнашивание.

Наиболее важным при любом характере изнашивания является критерий $\Phi_a = p_n/H$, или $\Phi_a = f p_n/H$, где p_n – номинальное давление, f – коэффициент трения. Используя указанный критерий и объединяя менее значимые критерии в коэффициент изнашивания K , получаем уравнение, аналогичное (1):

$$I_h = K \left(\frac{p_n}{H(h)} \right)^m,$$

или

$$h = K \left(\frac{p_n}{H(h)} \right)^m L, \quad (3)$$

где h – линейный износ (толщина изношенного слоя); m – эмпирический показатель степени.

Твердость материала трущихся деталей предполагается функцией глубины внедрения индентора, которая практически совпадает с величиной линейного износа, полученного в процессе изнашивания материала. В гетерогенном материале (например, покрытии на подложке) причина зависимости твердости от глубины $H(h)$ очевидна. В

гомогенном материале причина ее может быть в изменении структуры, размеров кристаллических зерен и т.п.

В статье [9] предложена зависимость $H(h)$ следующего вида:

$$\begin{cases} H(h) = H_f \text{ при } h \leq C\delta, \\ H(h) = H_s + 2C(H_f - H_s)\frac{\delta}{h} - C^2(H_f - H_s)\left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \text{ при } h > C\delta, \end{cases} \quad (4)$$

где h – координата, направленная от поверхности в глубь материала (глубина); H_f и H_s – твердости покрытия и подложки соответственно; δ – толщина покрытия; C – эмпирический коэффициент.

Зависимость (4) получена на основе энергетического метода оценки усилия внедрения индентора в пластический материал, что отличает ее от аналогичных зависимостей, полученных простой аппроксимацией результатов измерения твердости на поперечном или косом шлифе детали с покрытием на разных расстояниях от поверхности. Все величины в предложенной зависимости имеют конкретный физический смысл, в том числе коэффициент C . Он равен критическому значению отношения глубины внедрения индентора к толщине покрытия, при котором на результате измерения твердости начинает сказываться влияние подложки. Теоретический анализ и обобщение экспериментальных результатов показывают, что наиболее вероятный диапазон значений коэффициента C 0,25...0,3.

Величина H – твердость индентирования, измеренная при нагрузке на индентор, направленной по нормали к поверхности трения. В процессе абразивного изнашивания от величины H зависит глубина следа абразивной частицы при микрорезании или пластическом оттеснении материала. При адгезионном изнашивании твердость влияет на размер площадки фактического контакта неровностей шероховатости и, соответственно, на объем образовавшейся частицы износа при разрушении этого контакта. При измерении твердости индентирования индентор фактически является моделью абразивного зерна или единичной неровности шероховатости, его внедрение в анизотропный или гетерогенный материал подобно контактированию абразивного зерна или единичной неровности.

Приведенные на рис. 1 примеры описания зависимости $H(h)$ выражением (4) подтверждают хорошее соответствие теоретической зависимости характеру экспериментальных данных.

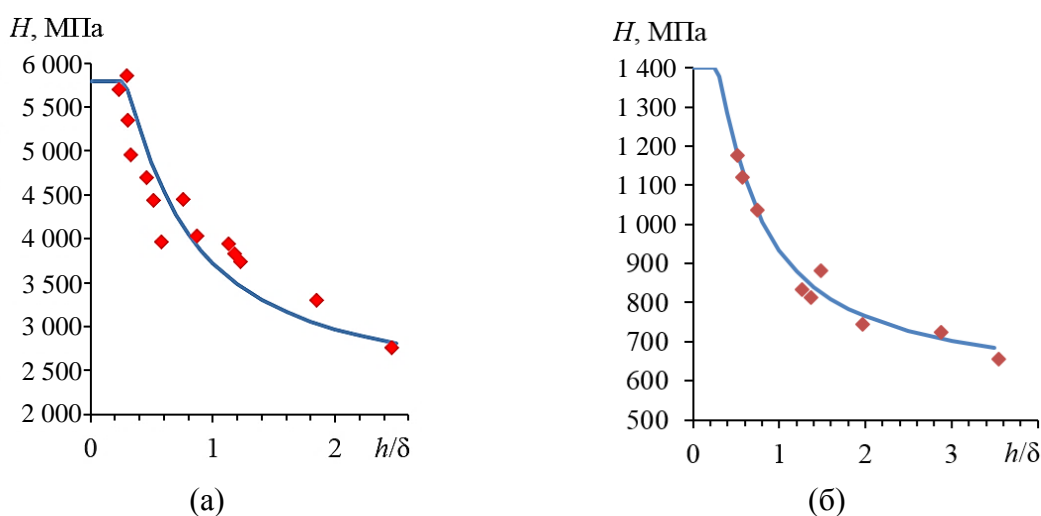


Рис. 1. Зависимость твердости от относительной величины внедрения индентора для поверхностей с покрытием: покрытие NiPdRe на латуни (а); покрытие NiP на меди (б)

При $h \leq C\delta$ твердость постоянна: $H = H_f$. Тогда при постоянной скорости изнашивания из уравнения (3) имеем

$$h = K \left(\frac{p_n}{H_f} \right)^m L,$$

или в безразмерном виде

$$\frac{h}{\delta} = K \left(\frac{p_n}{H_f} \right)^m \cdot \frac{L}{\delta}.$$

При $h = C\delta$ путь трения $L = L_0$. С этого момента на величину твердости начинает влиять подложка. Введем безразмерный путь трения

$$\lambda = K \left(\frac{p_n}{H_f} \right)^m \cdot \frac{L}{\delta}.$$

Очевидно, что $\lambda_0 = C$.

При $h \geq C\delta$ для элементарного участка пути трения dL можно записать

$$[H(h)]^m dh = K p_n^m dL,$$

где $H(h)$ определяется зависимостью (4).

Введя новую переменную $z = h/\delta$, проинтегрируем обе части полученного выражения:

$$J(z) = \int_C^z F(z) = K \left(\frac{p_n}{H_f} \right)^m \left(\frac{L}{\delta} - \frac{L_0}{\delta} \right) = \lambda - \lambda_0,$$

где $F(z)$ – правая часть уравнения (4).

Учитывая, что интеграл в левой части $J(z)$ есть функция верхнего предела и что $\lambda_0 = C$, получаем

$$J(z) + C = \lambda. \quad (5)$$

В общем случае интеграл $J(z)$ может быть найден только численно. При целочисленных значениях показателя степени m интеграл выражается аналитически, но полученные выражения громоздки, поэтому в настоящей статье не приводятся.

Уравнение (5) связывает безразмерную величину линейного износа z с безразмерной величиной пути трения λ , т.е. оно может использоваться для прогнозирования ресурса фрикционного узла в виде максимального пути трения по критерию максимально допустимого износа. В это уравнение в качестве параметров входят коэффициент C , показатель степени m и соотношение твердостей $\chi = H_f/H_s$. Их влияние на зависимость величины линейного износа от пути трения проанализировано ниже.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние параметра χ на зависимость относительной величины износа от относительного пути трения показано на рис. 2. При $h/\delta = C$ скорость изнашивания меняется: при более мягкой подложке (кривые 1 и 2) она увеличивается, более твердой (кривая 3) – уменьшается. Когда величина линейного износа достигнет толщины покрытия, погрешность в оценке величины пути трения, которая возникнет, если не учитывать влияние подложки, составит 27 % при $\chi = 1,5$; 42 % при $\chi = 2$; 52 % при $\chi = 0,5$. При этом если $\chi > 1$ (подложка мягче покрытия), то ресурс (предельный путь трения) переоценен, при $\chi < 1$ ресурс недооценен. Так, при $\chi = 0,5$ и $h/\delta = 1$ реальный ресурс в 2 раза превышает его же оценку для гомогенного материала.

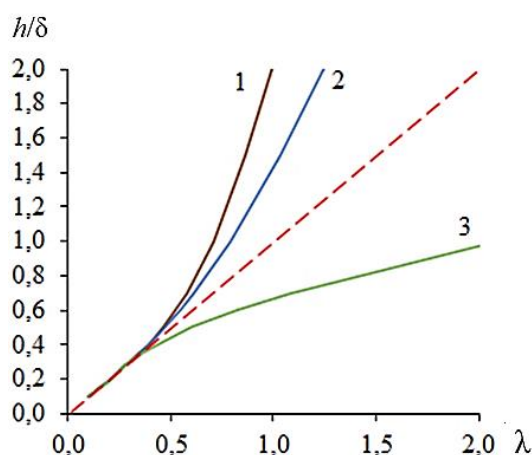


Рис. 2. Влияние параметра χ на зависимость относительного износа от безразмерного пути трения при $m = 3$: линия 1 – $\chi = 2$; линия 2 – $\chi = 1,5$; линия 3 – $\chi = 0,5$; пунктир – $\chi = 1$ (гомогенный материал); коэффициент $C = 0,25$

Влияние показателя степени m в уравнении (3) на зависимость относительной величины износа от относительного пути трения показано на рис. 3. Качественно это влияние вполне предсказуемо: с ростом величины показателя степени m влияние неоднородности материала усиливается. Количественные оценки следующие: при относительной величине износа $h/\delta = 1$ погрешность в оценке величины пути трения, связанная с игнорированием влияния подложки, составляет 27 % при $m = 2$ и 42 % при $m = 3$ (в обоих случаях $\chi = 2$).

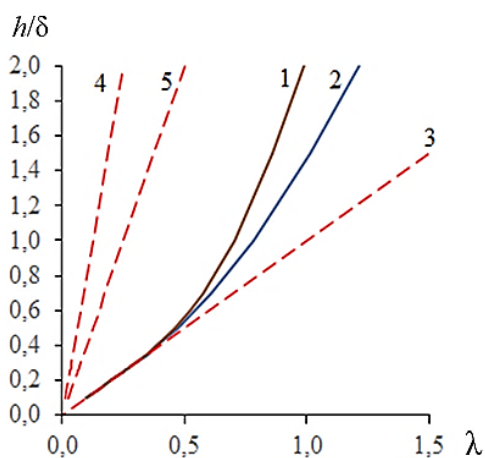


Рис. 3. Влияние параметра m на зависимость относительного износа от безразмерного пути трения: сплошные линии – гетерогенный материал (1 – $m = 3, \chi = 2$; 2 – $m = 2, \chi = 2$); пунктир – гомогенный материал (3 – $\chi = 1$; 4 – $H = H_s, m = 3$; 5 – $H = H_s, m = 2$)

Еще более значительные погрешности в расчете максимального пути трения возникают, если при оценке ресурса использовать в качестве твердости постоянную величину, равную твердости подложки H_s . Оценка ресурса фрикционного соединения в этом случае оказывается сильно заниженной: в 5,6 раза при $m = 3$ и в 3,1 раза при $m = 2$ для $h/\delta = 1$ и $\chi = 2$ (см. рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что аналитические зависимости, аналогичные зависимости (5), не могут претендовать на высокую точность прогнозирования износа фрикционных соединений ввиду случайного характера процесса изнашивания, их применение в ряде случаев может быть полезным. Они могут использоваться, например, для прогнозирования повышения износостойкости фрикционного соединения при применении новых материалов и покрытий, а также для прогнозирования ресурса узла трения на стадии проектирования, когда соответствующие статистические данные отсутствуют или их объем недостаточен.

Поскольку для повышения износостойкости трущихся деталей очень широко используются различного рода покрытия рабочих поверхностей, используемые для прогнозирования ресурса аналитические зависимости должны учитывать неоднородность механических свойств материалов компонентов фрикционной пары.

Предложенная в данной работе методика прогнозирования ресурса фрикционного соединения по критерию предельно допустимого износа обобщает предложенные нами ранее аналогичные расчетные методики [7, 10].

Анализ полученных результатов подтверждает существенное влияние соотношения твердостей покрытия и основного материала трущихся деталей на оценку ресурса узлов трения. Предложенная методика такой оценки, помимо непосредственной цели, может использоваться при обработке экспериментальных данных по определению коэффициента износа K – основной характеристики износостойкости той или иной пары трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин. М.: Юрайт. 2017. 264 с.
2. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
4. Ludema K.C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. Boca Raton: CRC Press. 1996. 264 p.
5. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. 1995. Т. IV-1. 864 с.
6. Fundamentals of friction and wear on the nanoscale / eds. E. Gnecco, E. Meyer. Springer. 2015. 704 p.
7. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О прогнозировании ресурса узлов трения по критерию допустимого износа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 5–17.
8. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // *Современная трибология: итоги и перспективы*. 2007. С. 24–32.
9. Измайлов В.В. Влияние покрытий на процессы механического и электрического контактирования шероховатых поверхностей // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 6. С. 1026–1047.
10. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 5–14.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. К методике оценки ресурса фрикционного соединения деталей с покрытием по критерию предельного износа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 33–39.

**ON THE METHODOLOGY
OF A FRICTION CONNECTION RESOURCE EVALUATION
FOR COATED PARTS BY LIMITING WEAR CRITERION**

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

Analytical dependencies are proposed to predict the wear of coated parts, the hardness of which differs from the hardness of the base material. To describe the dependence of the material hardness on the distance to the friction surface, a formula was used that was obtained using the energy method for estimating the force of indenter penetration into a plastic material. The calculation of the resource of the friction unit according to the wear criterion is based on the J. Archard equation known in tribology, generalized to the case of a nonlinear (power-law) dependence of the wear rate on the hardness of the wear material and the applied normal load. It is shown that in this case, ignoring the hardness gradient when estimating the resource of a friction unit leads to an even more significant error than in the case of a linear dependence of the wear rate on hardness. Depending on the ratio of the hardness of the coating and the substrate, the resource of the friction unit is either overestimated or underestimated, which negatively affects the reliability and efficiency of the equipment. In the first case, the probability of a failure increases, in the second, part of the resource remains unused.

Keywords: friction, wear, coating, hardness, resource, prediction.

Поступила в редакцию/received: 05.05.2023; после рецензирования/revise: 11.05.2023;
принята/accepted: 15.05.2023

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.19

КОНТРОЛЬ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ МАГНИТОСИЛОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., Новикова О.О., 2023

Предложена методика контроля однородности намагниченности магнитов, основанная на экспериментальном определении напряженности магнитного поля на полярной поверхности магнита различной формы. При отклонении экспериментального значения магнитного поля от расчетного, определенного по характеристикам, указанным в соответствующем ГОСТе, более чем на 10 % магниты бракуются. Для выполнения расчетов магнитосиловых свойств механизмов предлагается использовать экспериментально определенное среднее значение намагниченности. Теоретические формулы для определения магнитного поля призматических, цилиндрических и кольцевых магнитов получены с использованием метода эквивалентного соленоида.

Ключевые слова: постоянные магниты, высококоэрцитивные магнитные материалы, намагниченность, магнитная сила, магнитные механизмы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-40-46

ВВЕДЕНИЕ

Активное производство механизмов с магнитной связью (муфт, редукторов, подшипников, пружин фиксирующих устройств) началось после создания в конце прошлого века магнитов на основе редкоземельных элементов [1–7], которые характеризуются в первую очередь высокой остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой.

Разделяют два класса редкоземельных магнитов [5, 8]: на основе сплава самария и кобальта (Sm-Co) и на основе сплава, содержащего неодим, железо и бор (Nd-Fe-B). Магниты первой группы (Sm-Co) имеют остаточную индукцию 0,7...0,95 Тл, температурный коэффициент обратимых изменений остаточной намагниченности 0,035...0,045 %/°С и диапазон изменения рабочих температур от –70 до 300 °С. Остаточная индукция магнитов Nd-Fe-B второй группы существенно выше: 1...1,35 Тл, однако температурный коэффициент у них больше – 0,07...0,13 %/°С, а диапазон рабочих температур менее широкий – 60...180 °С. Магниты Nd-Fe-B более дешевы, но имеют низкую коррозионную стойкость и, как правило, требуют нанесения специальных защитных покрытий. Отметим, что ферритовые магниты, имевшие широкое распространение до появления магнитов редкоземельных, характеризуются остаточной индукцией не более 0,4 Тл и температурным коэффициентом 0,2 %/°С.

Магнитостатическая сила взаимодействия идеальных магнитов зависит от намагниченности во второй степени, поэтому сила между магнитами из сплава Nd-Fe-B примерно в 2 раза выше, чем для аналогичных по размерам магнитов из сплава R-Co.

Для расчета сил взаимодействия между постоянными магнитами удобно использовать метод эквивалентного соленоида [6, 7]. Этот метод можно применять при расчете магнитных полей, создаваемых современными высококоэрцитивными магнитами на основе редкоземельных элементов. Предполагается, что такие магниты имеют однородную и анизотропную намагниченность, поэтому их можно представить в виде соленоидов с постоянной плотностью тока в обмотке соленоида. Однако используемые на практике магниты обычно не имеют однородную намагниченность, так что расчеты магнитных сил будут не совсем точные. Кроме того, при нагревании магнитов происходит обратимое и необратимое уменьшение остаточной намагниченности, которое зависит от температуры, локальной структуры материалов, формы и размеров магнитов. В результате этих изменений магниты в определенной мере теряют однородную намагниченность, что тоже следует учитывать при расчете магнитных механизмов.

Неоднородная намагниченность не только затрудняет теоретические расчеты, но и может привести к ухудшению свойств магнитных механизмов. Нами было показано, что, несмотря на применение в магнитных подшипниках постоянных магнитов с осевой симметрией формы, внешнее магнитное поле не сохраняет осевую симметрию. При измерении поля по соосным с магнитом окружностям, лежащим на некотором расстоянии от его поверхности, наблюдаются случайные отклонения величины индукции поля от среднего значения. Величина неоднородности поля зависит от материала магнитов и способа его получения. Например, для цилиндрических магнитов из сплава SmCo_5 с осевой намагниченностью, полученных изостатическим прессованием, неоднородность поля на расстоянии 10^{-4} м от поверхности магнита составляет 2...2,5 %. Для магнитов, изготовленных методом линейного прессования, однородность поля хуже и составляет 3...5 %. Действие размагничивающих полей может ухудшать однородность поля магнита.

Во время работы магнитного подшипника на каждый из магнитов воздействует со стороны сопряженных магнитов переменное магнитное поле, которое приводит к тому, что на вращающуюся часть подшипника действует электромагнитный момент торможения, обусловленный диссипацией кинетической энергии на вихревые токи и магнитный гистерезис. Поэтому для повышения точности расчета магнитных сил между постоянными магнитами и увеличения эффективности функционирования магнитных механизмов необходимо контролировать степень однородности намагниченности по объему магнитов.

Цель работы заключалась в создании простой и достаточно объективной методики контроля намагниченности постоянных магнитов и ее однородности по объему для оценки возможности применения магнитов в технических устройствах.

Методика для контроля свойств (остаточной намагниченности, однородности намагниченности) и отбраковки высококоэрцитивных постоянных магнитов в виде параллелепипеда, цилиндра или кольца, которые изготовлены из сплавов Fe_2O_3 -Ba, Nd-Fe-B, Sm-Co и прочих, распространяется только на магниты, которые предполагается использовать в магнитосиловых устройствах, например системах магнитной разгрузки, муфтах или подшипниках.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Основным показателем качества магнитосиловых систем является величина магнитной силы притяжения или отталкивания, возникающей между постоянными магнитами, а также постоянным магнитом и ярмом из магнитомягкого материала. Для сокращения затрат относительно дорогого магнитомягкого материала и уменьшения размеров магнитной системы величина силы должна быть максимально возможной в расчете на единицу объема магнита. Магнитная сила (для магнитов оговоренных материалов) пропорциональна квадрату остаточной намагниченности J_r , поэтому именно остаточная намагниченность выбрана в качестве основного контролируемого параметра.

В идеальном случае постоянный магнит должен иметь однородную по всему объему намагниченность. Однако по технологическим причинам, а также в результате некачественного намагничивания постоянные магниты имеют неоднородную магнитную структуру, т.е. содержат области с различной остаточной намагниченностью. Определение степени однородности намагниченности предлагается производить по значениям напряженности магнитного поля, создаваемого магнитом в нескольких точках около его поверхности. Значения величины полей не должны существенно отличаться от соответствующих значений, полученных для однородно намагниченных магнитов.

Поле однородного магнита рассчитывают теоретически, т.е. исходят из гостированного значения остаточной намагниченности и учитывают его форму и размеры. Если величина поля контролируемого магнита не такая, как у идеального, то его намагниченность нельзя считать однородной.

При производстве магнитов разброс свойств может достигать 10 % и более [9]. Принято считать технологически разумным допустимое отклонение свойств магнитов от гостированных на 10 % в меньшую сторону и на любое – в большую.

Если учитывать ошибку измерения намагниченности магнитов в производственных условиях, то намагниченность поставляемого с завода магнита может отличаться от номинальной на величину до 15 %.

Приведем пример, показывающий экономические последствия технического применения магнитов с намагниченностью, которая на 10 % меньше нормированной. В пассивных магнитных подшипниках используются магниты из закритических магнитомягких материалов, которые работают на отталкивание или притяжение. Максимальная сила F_{\max} взаимодействия (при зазоре, стремящемся к нулю) между двумя цилиндрическими магнитами оптимальных размеров выражается по формуле

$$F_{\max} = 4,5 \cdot 10^{-5} \mu_0 J_r^2 V^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; J_r – остаточная намагниченность; V – объем магнита.

Оптимальными считались магниты с такими размерами, для которых заданная сила взаимодействия реализуется при минимальном объеме магнитомягкого материала. Расчеты показывают, что у оптимальных магнитов соотношение размеров $\frac{h}{r} = 1,19$, где h – высота, r – радиус магнита.

Из выражения (1) для силы взаимодействия получается, что при уменьшении намагниченности на 10 % сила взаимодействия снижается более чем на 20 %. Чтобы компенсировать уменьшение силы, требуется увеличить на 33 % объем магнитомягкого материала. В денежном выражении это приводит к удорожанию материала для изготовления магнитосиловой продукции на ~25 долл/кг ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) и на ~30 долл/кг (SmCo_5) [10].

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ

В основе методики лежат аналитические расчеты магнитного поля магнитов различной формы с однородной намагниченностью. Расчет проводился методом эквивалентного соленоида для «идеальных» магнитов с однородной намагниченностью. Учитывая геометрию магнитов в виде призмы, для описания магнитного поля использовали декартову систему координат, начало которой находилось в середине ребра магнита, вдоль которой направлен вектор намагниченности. Размеры магнита были приняты следующими: a , b – стороны полярной поверхности; h – высота магнита.

Аналогичным методом в цилиндрической системе координат выполнялся расчет магнитного поля цилиндрического магнита с радиусом r и высотой h , намагниченного вдоль оси. Полярную ось z удобно направить вдоль оси магнита, а начало отсчета зафиксировать на его поверхности.

Призматические магниты (рисунок а). Фиксируются три точки на полярной поверхности магнита для определения его свойств: первая – в центре поверхности; две другие – на прямой, проходящей параллельно большому ребру магнита через центр на расстоянии $a/6$ от краев магнита, где a – длина большей стороны магнита. Могут быть взяты и любые другие точки, только не на близком расстоянии от краев, где есть большая неоднородность магнитного поля. Другая причина выбора указанных точек на поверхности магнита заключается в том, что в этих точках по технологическим причинам может наблюдаться более низкое значение намагниченности. При выборе точек наблюдения следует учитывать и размер активной зоны датчика Холла (у миниатюрных, но дорогостоящих датчиков Холла размеры активной зоны могут быть менее $0,1 \times 0,1$ мм²).

Рассчитываются значения напряженности магнитного поля в указанных точках для «идеального» магнита. Для центральной точки 1 – по формуле

$$H_{p1} = \frac{J_r}{\pi} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{ab}{2\Delta \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + 4\Delta^2}} - \operatorname{arctg} \frac{ab}{2(\Delta+h) \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + 4(\Delta+h)^2}} \right]; \quad (2)$$

для крайних точек 2, 3 – по формуле

$$H_{p2,3} = \frac{J_r}{2\pi} \cdot \left[-\operatorname{arctg} \frac{(a-x) \cdot \frac{b}{2}}{(h+\Delta) \cdot \sqrt{(a-x)^2 + \frac{b^2}{4} + (h+\Delta)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{x \cdot \frac{b}{2}}{(h+\Delta) \cdot \sqrt{x^2 + \frac{b^2}{4} + (h+\Delta)^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a-x) \cdot \frac{b}{2}}{\Delta \cdot \sqrt{(a-x)^2 + \frac{b^2}{4} + \Delta^2}} + \operatorname{arctg} \frac{x \cdot \frac{b}{2}}{\Delta \cdot \sqrt{x^2 + \frac{b^2}{4} + \Delta^2}} \right], \quad (3)$$

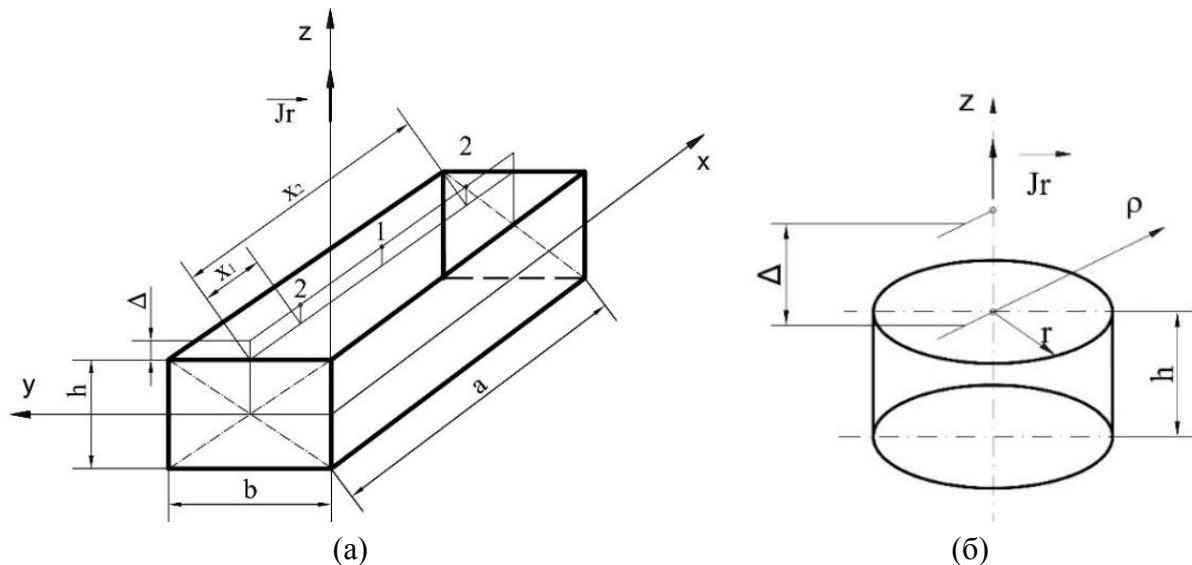
где J_r – остаточная намагниченность (берется из соответствующих ГОСТов); Δ – расстояние от поверхности магнита до преобразователя Холла (обычно 0,4...1,2 мм); $x_1 = a/6$, $x_2 = 5a/6$, $y = b/2$, $z = \Delta+h/2$ – координата точки, в которой измеряется поле.

С помощью тесламетра (гауссметра) измеряется напряженность магнитного поля в указанных точках для контролируемого магнита. Можно использовать достаточно точный тесламетр марки Ф4354/1, у которого $\Delta = 0,4$ мм.

Цилиндрические магниты (рисунок б). Для цилиндрических магнитов принято экспериментально определять напряженность магнитного поля в двух точках, расположенных на расстоянии Δ от центра полярных поверхностей. Для этих же точек рассчитывается магнитное поле H_c «идеального» магнита по формуле

$$H_c = \frac{J_r}{2} \left[\frac{\Delta+h}{\sqrt{R^2+(\Delta+h)^2}} - \frac{\Delta}{\sqrt{R^2+\Delta^2}} \right]. \quad (4)$$

Как и в предыдущем случае, остаточная намагниченность берется из соответствующего ГОСТа.



Расчетные схемы призматического (а) и цилиндрического (б) магнитов

Магниты в виде кольца прямоугольного сечения. Приведенную формулу (3) можно вполне применить и для расчета магнитного поля H_r кольцевого магнита. Кольцевой магнит в этом случае представляется в виде двух соленоидов, вставленных один в другой, по обмоткам которых протекают токи Ампера в противоположных направлениях. Тогда магнитное поле в точке $z = \Delta$ на оси магнита

$$H_r = H_c(r) - H_c(R),$$

где R, r – внешний и внутренний радиусы кольцевого магнита.

Анализ результатов. Сравниваются расчетные и экспериментальные значения напряженности поля:

если расхождение значений поля в идентичных точках не превышает 10 %, то магнит считается однородно намагниченным и может использоваться в магнито-силовых системах;

если хотя бы одно экспериментальное значение напряженности поля меньше расчетного более чем на 10 %, то магнит отбраковывается.

Для прошедших контроль магнитов рассчитывается среднее значение остаточной намагниченности. Определяются три (призматические магниты) или два (цилиндрические магниты) значения намагниченности J_r по экспериментальным величинам магнитного поля на основании использования вышеприведенных формул (2)–(5). Затем находится среднее значение намагниченности магнита и по этому значению рекомендуется проводить расчеты магнитных систем конкретных механизмов. Отбракованные магниты могут найти применение в менее ответственных магнитных механизмах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена простая и наглядная методика оценки однородности намагниченности постоянных магнитов из закритических магнитомягких материалов. Методика основана на экспериментальном изучении топографии магнитного поля постоянного магнита. Недопустимым считается отклонение намагниченности постоянного магнита на 10 % в меньшую сторону от значения, указанного в ГОСТе на магнитный материал. Для расчетов магнитных механизмов предложено использовать среднее значение намагниченности, определенное для трех или двух областей магнита. В данном случае качество магнитного механизма будет достигнуто при меньшем объеме дорогостоящего магнитного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Filion G., Ruel J., Dubois M.R. Reduced-Friction Passive Magnetic Bearing: Innovative Design and Novel Characterization Technique // *Machines*. 2013. V. 1. P. 98–115.
2. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация размеров бесконтактного магнитного механизма поступательного перемещения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 12–20.
3. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
4. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Journal of Friction and Wear*. 2004. V. 25. № 3. P. 286–291.
5. Bolotov A.N., Khrenov V.L. Tribology of bearings and guides with magnetic loading off // *Journal of Friction and Wear*. 1995. V. 16. № 6. P. 1048–1069.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография. Изд. 2-е, испр. и доп. Тверь: ТвГТУ. 2013. 123 с.
7. Comparative study of torque analysis for synchronous permanent magnet coupling with parallel and halbach magnetized magnets based on analytical field calculations / H. Kang [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. V. 50. № 11. P. 1–4.
8. Тишин А.М. Перспективы применения редкоземельных постоянных магнитов в электроприводах специального назначения. К 100-летию использования постоянных магнитов в технике // *Инноватика и экспертиза*. 2017. Т. 1. № 19. С. 175–192.
9. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия. 1971. 486 с.
10. Экономические аспекты производства постоянных магнитов (обзор) / И.В. Чередниченко [и др.] // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 4 (22). С. 58–76.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О. Контроль намагниченности промышленных постоянных магнитов для магнитосиловых механических систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 40–46.

CONTROL OF THE MAGNETIZATION OF INDUSTRIAL PERMANENT MAGNETS FOR MAGNETIC-POWER MECHANICAL SYSTEMS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

A method for controlling the homogeneity of magnetization of magnets is proposed, based on the experimental determination of the magnetic field strength on the polar surface of a magnet of various shapes. If the experimental value of the magnetic field deviates from the calculated value determined by the characteristics specified in the corresponding GOST, the magnets are rejected by more than 10 %. To perform calculations of the magnetosilic properties of mechanisms, it is proposed to use an experimentally determined average value of magnetization. Theoretical formulas for determining the magnetic field of prismatic, cylindrical and annular magnets are obtained using the equivalent solenoid method.

Keywords: permanent magnets, high-coercivity magnetic, magnetization, magnetic force, magnetic mechanisms.

Поступила в редакцию/received: 04.04.2023; после рецензирования/revised: 20.04.2023;
принята/accepted: 27.04.2023

УДК 620.16

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КАРБОНАТНОГО БЕТОНА

В.В. БЕЛОВ, д-р техн. наук, Т.Р. БАРКАЯ, канд. техн. наук,
П.В. КУЛЯЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vladim-bel@yandex.ru

© Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В., 2023

В статье рассмотрена зависимость механического поведения карбонатного бетона от скорости деформации. Установлено, что в основе этой зависимости лежат два различных физических механизма: процесс разрушения, влияющий на скорость образования трещин, и вязкоупругие деформации неповрежденной (неразрушенной) цементной пасты. Показано, что при анализе различных аспектов механизма разрушения следует принимать во внимание трещинообразование для простых и карбонатных бетонов и учитывать влияние скорости деформации. Выявлено, что для формирования полной картины разрушения этих бетонов механизм образования трещин должен быть включен в анализ различных аспектов морфологии сечений образцов и проявления признаков роста трещин.

Ключевые слова: мелкозернистые карбонатные бетоны, деформативные свойства, трещиностойкость, влияние известнякового микронаполнителя, химические добавки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-46-52

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (19), 2023*

ВВЕДЕНИЕ

Получение эффективных мелкозернистых карбонатных бетонов (МЗКБ) с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами связано с необходимостью изучения механических свойств этих бетонов на разных уровнях воздействия [1, 2]. В МЗКБ присутствует так называемая матрица, состоящая из цементного раствора, различных добавок и жесткого скелета из заполнителя. Снижение уровня деформаций МЗКБ сводится к реализации процессов [3] выравнивания гидратации за счет более равномерного распределения частиц цемента в объеме МЗКБ; физического вытеснения воды из воздушных и капиллярных микропор и частичного перевода ее в гелевую область.

Правильные дозирование, степень дисперсности и технология введения добавок ведут к снижению деформаций МЗКБ, делая последние более прочными и стойкими к агрессивным средам [4].

В статьях [5–7] представлены современные исследования МЗКБ с минеральными добавками и рассмотрено влияние разнообразных факторов на его физико-механические свойства. Деформативность при ползучести является не менее важным параметром, определяющим эксплуатационные характеристики МЗКБ [8]. На эти характеристики влияют и такие факторы, как водотвердое отношение, размер заполнителя, тонкость помола вяжущего, влажность, возраст бетона к моменту приложения нагрузки и сама величина нагрузки [9–11].

Влияние таких параметров, как структура, состав бетона, процентное содержание пластифицирующих и минеральных добавок, освещено в работах, где, помимо прочего, отмечается влияние известнякового тонкодисперсного наполнителя на реологические и технологические свойства бетона [12–14].

Методика оценки долговечности бетонов на композиционном вяжущем рассмотрена в статье [15].

Таким образом, анализ опубликованных работ, как приведенных выше, так и других по данной теме, показывает, что при разработке технологии МЗКБ особое внимание уделяется повышению прочности, морозостойкости, стойкости к циклическим нагрузкам и истиранию (например, при получении дорожных конструкций), что не всегда возможно реализовать при существующих методах проектирования композиций МЗКБ и технологиях производства. Особенно это касается задачи повышения трещиностойкости данных бетонов. Таким образом, необходимо совершенствовать научные методы и способы повышения эксплуатационно-технологических свойств МЗКБ, прежде всего их трещиностойкости и долговечности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе нагружения в бетонах при ударных и длительных нагрузках, как и при длительных статических, скорость деформации изменяется для различных стадий (возникновения трещин, их распространения и после разрушения). В целом это зависит от динамических свойств бетона, времени воздействия и ряда других факторов.

В табл. 1 приведены составы смеси для обычного мелкозернистого и карбонатных бетонов. Карбонатный наполнитель был измельчен до удельной поверхности $350 \text{ м}^2/\text{кг}$. В ходе испытаний на образцах-балках размером $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$, выполненных из обычного и карбонатного бетонов, оценивали деформации для различной нагрузки.

Таблица 1. Составы и свойства обычного (производственного) и карбонатных бетонов

Компоненты бетона и свойства	Составы бетона, кг/м ³		
	Производственный состав мелкозернистого бетона	МЗКБ № 1	МЗКБ № 2
Цемент	650	336	472
Песок	1 460	–	–
Заполнитель из отсева дробления известняка	–	1 528	1 528
Вода	286	333	295
Молотый известняк	–	336	200
СП-1 (сухой)	–	2,52	5,04

Гидравлический пресс (рис. 1) применяли в качестве испытательной установки для оценки уровня мгновенных и устойчивых деформаций. Ступенчатая предварительная нагрузка составляла 500 Н. Электрические датчики измеряли начало трещины. Электроизмеритель был наклеен на участки контрольных деформаций (в нижней части испытательных балок).

В эксперименте под ударной нагрузкой применяли чуть более длинные образцы-балки из железобетона обычного и карбонатного составов. Арматура состояла из основных стержней класса А300, продольных стержней диаметром 12 мм и поперечных диаметром 8 мм.



Рис. 1. Испытательное устройство с образцом и электрическим измерителем для определения мгновенных и длительных напряжений

В ходе оценивания эффекта деформации при ударе использовали специальное устройство для сброса (рис. 2). Ударный испытательный стенд представлял собой наконечник-груз весом 100 Н со средней скоростью приложения удара 0,2 с. Для измерения мгновенных и устойчивых деформаций использовался измерительный мостик. Рычаг вместе с грузом-наконечником фиксировался защелкой с застежкой, которая при нажатии отпускала рычаг и справлялась с ударной нагрузкой. Высота подъема рычага соответствовала чувствительности электрических датчиков для фиксации момента трещины, дальнейшее развитие которой контролировалось с помощью фото- и видеофиксации. Электрические тензометры были подсоединены к тензоэлектрическому измерительному прибору с гальванометром постоянного тока по параллельной цепи.

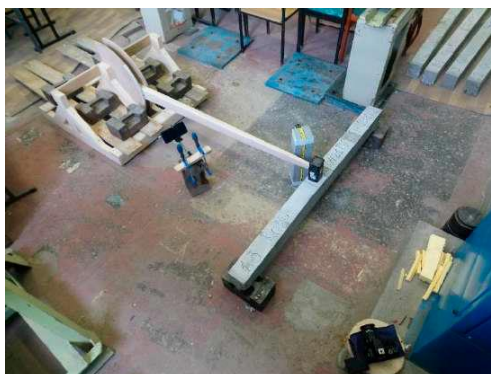


Рис. 2. Испытательное устройство для измерения ударных напряжений

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены результаты определения трещинообразующих деформаций для обычного и карбонатного бетонов под нагрузкой.

Таблица 2. Влияние вида нагрузки и длительности нагружения на трещинообразующие деформации для обычного и карбонатного бетонов

Условия нагружения		Трещинообразующие деформации, 10^{-3}		
Вид нагрузки	Время	Обычный бетон	МЗКБ № 1	МЗКБ № 2
Ударная	20 мкс	2,1	2,6	2,4
Кратковременная	1 час	2,9	5,2	3,0
Длительная	7 суток	3,2	5,6	3,3

В табл. 2 показаны характеристики разрушения карбонатного бетона (в балках) в сравнении с обычным по периодам приложения нагрузки. Некоторые деформации ползучести включены в полную величину деформаций, образующих трещины в результате длительной нагрузки. Уровень трещинообразующих деформаций зависит от длительности приложения и интенсивности нагрузки. В целом для карбонатного бетона этот уровень несколько выше, чем для простого (см. табл. 2). Чем больше продолжительность действия нагрузки, тем медленнее для обычного бетона растут значения трещинообразующих деформаций, особенно в случае кратковременной нагрузки с одинаковым шагом. Для карбонатного бетона значения деформаций растрескивания при увеличении продолжительности нагрузки возрастают незначительно, при этом к ним добавляются пластические деформации ползучести. Карбонатный тонкоизмельченный наполнитель создает пластичные зоны, демпфирующие ход трещинообразующих деформаций; в верхней части канала трещины карбонатных бетонов создают площадь накопления упругой деформации, которая больше, чем в обычных бетонах, за счет того, что добавка с карбонатным наполнителем и суперпластификатором охватывает микро- и мезозоны канала трещины в бетоне.

Изменение величины трещинообразующей деформации влияет и на картину разрушения. У обычного бетона это раскол с большой основной трещиной, а у карбонатного – формирование кластера с микротрещинами.

На заключительном этапе образцы нагружались до появления разрушения с трещиной, развивающейся перпендикулярно продольной оси образца (оба конца балки опирались на шарниры) (рис. 3). На стадии развития трещин не было разрушений по наклонным участкам, в отличие от обычного бетона, который показал известную картину разрушения.



Рис. 3. Процесс разрушения образца карбонатного бетона

На рис. 4 показано разрушение образца карбонатного бетона состава № 2 (МЗКБ № 2). В отличие от обычного бетона, который разрушается хрупко с минимальными значениями трещинообразующих деформаций, образцы на карбонатном бетоне разрушаются постепенно, имея большую площадь пластичности в верхней части основной трещины, которая ограничивает изменения трещинообразующих деформаций. Для обычного бетона эти участки являются менее пластичными, что снижает значения трещинообразующих деформаций.

На половине образца после испытания (рис. 4б) проявляются узловые включения частиц наполнителя в мягкой матрице карбонатного микронаполнителя. Эта шероховатая развитая поверхность – результат вязкопластичных внутренних мезо- и микросмещений, сопровождающих процесс разрушения. Все они задерживают образование трещин в карбонатных бетонах. Поверхности разрушения в обычном бетоне более гладкие, что показывает меньшее сопротивление процессу развития трещин по сравнению с карбонатными бетонами.



(а)



(б)

Рис. 4. Процесс разрушения контрольного образца карбонатного бетона (а) и одна из его половин с шероховатой развитой поверхностью после разрушения (б)

ВЫВОДЫ

Карбонатный наполнитель пластифицирует цементную матрицу и окружающие агрегатные зоны и укрепляет контактные зоны между цементным камнем и заполнителем, способствует образованию микропластичных зон, поглощая удар и устойчивую энергию, тем самым увеличивая полные трещинообразующие деформации и делая карбонатный бетон более стойким к ударным нагрузкам.

Установлено, что замена 50 % цемента измельченным известняком в бетонной смеси способствует сокращению локальных факторов напряжения, которые влияют на поведение бетона при разрушении. Между наполнителем и связующим сформирована более однородная и прочная композитная структура. Это повышает трещиностойкость карбонатного бетона и его динамическую прочность, что приводит к повышению эффективности и улучшению физико-механических свойств карбонатного бетона. За счет изменяющейся объемной пластической деформации матрицы объемное деформационное сглаживание композитной микроструктуры улучшает механические характеристики карбонатного бетона, особенно в долгосрочной перспективе, без значительных потерь технологических свойств на начальном этапе.

Более высокая устойчивость карбонатного бетона к трещинообразованию во многом обусловлена лучшей упаковкой частиц внутри бетонной матрицы и уменьшением пористости. Данные факторы вызывают перенос микротрещин из воздушных и капиллярных областей в микрзоны и распад мезотрещин на внутренние микроструктурные ядра, лишение композитной структуры микропластических энергозатратных областей. В итоге карбонатный бетон становится менее хрупким, чем обычный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2008. Вып. 13. С. 341–346.

2. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // *Строительные материалы*. 2016. № 9. С. 68–72.

3. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей // *Стройпрофиль: строительные технологии и бетоны*. 2012. № 2. С. 26–30.

4. Применение карбонатных добавок в цементных составах для гидроизоляционных и реставрационных работ зданий и сооружений / А.А. Плугин [и др.] // *Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры МГСУ*. 2011. С. 224–227.

5. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete // *36th conference on our world in concrete & structures: recent advances in the technology of fresh concrete, proceedings*. Ghent: Ghent University. 2011. P. 49–54.

6. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 5. С. 167–174.

7. Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2015. № 3 (675). С. 14–22.

8. Белов В.В., Субботин С.Л., Куляев П.В. Прочностные и деформативные свойства бетонов с карбонатными микронаполнителями // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 25–29.

9. Балыков А.С., Низина Т.А., Макарова Л.В. Разработка составов высокопрочных мелкозернистых бетонов на природном и техногенном заполнителях и критериев оценки их эффективности // *Высокопрочные цементные бетоны*:

технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016): Сборник тезисов конференции. Казань: КазГАСУ. 2016. С. 19.

10. Chaid R., Jauberthie1 R., Boukhaled A. Effet de l'ajout calcairesur la durabilite des betons // *Lebanese Science Journal*. 2010. V. 11. № 1. P. 91–103.

11. Desnerck P., Schutter G. De., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers // *Structural concrete*. 2012. V. 13. № 2. P. 95–101.

12. Хозин В.Г., Сибгатуллин И.Р., Хохряков О.В., Красникова Н.М. Производство ЦНВ из техногенных отходов – эффективный путь решения экологических и сырьевых проблем // *Строительные материалы*. 2012. № 6. С. 190–192.

13. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов. Омск: СибАДИ. 2011. 461 с.

14. Использование композиционных вяжущих для повышения долговечности бетонной брусчатки / В.С. Лесовик [и др.] // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 52–54.

15. Методика прогноза механических параметров бетонов методом численного моделирования / В.Т. Ерофеев [и др.] // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова*. Москва: ООО «ТПП». 2015. Т. 2. С. 29–31.

Для цитирования: Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Повышение трещиностойкости карбонатного бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 46–52.

INCREASING THE CRACK RESISTANCE OF CARBONATE CONCRETE

V.V. BELOV, Dr. Sc., T.R. BARKAYA, Cand. Sc., P.V. KULYAEV, Cand. Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: vladim-bel@yandex.ru

The dependence of mechanical behavior of carbonate concrete on strain rate is considered in the article. It has been established that this dependence is based on two different physical mechanisms: the fracture process, which affects the rate of crack formation, and the viscoelastic deformation of the undamaged (undamaged) cement paste. It is shown that cracking for plain and carbonate concretes should be taken into account when analyzing different aspects of the fracture mechanism and the influence of the deformation rate should be taken into account. It has been revealed that in order to form a complete picture of fracture of these concretes the mechanism of crack formation should be included in the analysis of various aspects of morphology of sample cross-sections and manifestation of crack growth signs.

Keywords: fine-grained carbonate concretes, deformative properties, crack resistance, influence of limestone microfillers, chemical additives.

Поступила в редакцию/received: 20.04.2023; после рецензирования/revised: 04.05.2023;
принята/accepted: 11.05.2023

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331:556.043

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОЛЕВУЮ СУШКУ ТОРФЯНОГО СЛОЯ ПРИ ЕГО ДОБЫЧЕ

О.В. ПУХОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: owpuhova@mail.ru

© Пухова О.В., 2023

Рассмотрены вопросы влияния технологических параметров (уровня вод, погоды), от которых зависит скорость сушки продукции, при разработке торфяного месторождения «Святинское», а точнее, при полевой сушке торфяной крошки, получаемой фрезерованием залежи. Для опытных карт производственной площадки приведены показатели сезонных исследований. Для этого были определены влажность сушимого слоя, показатели колебания уровня грунтовых вод и объем влаги, которая впитывалась из подстилающей залежи и дождевых осадков, увлажняя сушимый торфяной слой. На четырех картах с открытой осушительной сетью в течение сезона проведено наблюдение за погодными условиями, а также колебаниями уровня грунтовых вод в картовых каналах. Проанализированы сложность заложения щелевого дренирования и его влияние на водно-воздушный режим верховой залежи при изменении уровня грунтовых вод в течение сезона. Показано, что щелевой дренаж совместно с открытыми каналами оказывает благоприятное действие на осушение производственной площадки. Установлено, что грунтовые воды под действием гравитационных сил, т.е. при разности напоров в торфяной залежи и дренах, просачиваются внутрь полости, затем под уклоном сбрасываются в сборную сеть открытых каналов и выводятся за пределы осушаемой производственной площадки. Рекомендовано использовать результаты сезонных исследований и анализ процессов передвижения влаги для разработки и обоснования мероприятий по улучшению водно-воздушного режима торфяной залежи с разработкой интенсивного метода осушения, а также для сохранения необходимых условий.

Ключевые слова: торфяная крошка, метеорологические показатели, гидрологический режим, уровень грунтовых вод, открытая осушительная сеть, дренаж, процессы сушки, торфяная залежь, торфяной слой.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-53-61

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время промышленные предприятия активно осваивают новые схемы мелиорации торфяников, под которыми расположены песчаные залежи, современные способы получения органоминеральных формованных удобрений с полным набором микроэлементов, а также создания инновационной продукции [1, 2] для использования в зеленом строительстве и сельском хозяйстве.

Добыча торфа зависит от климатических условий, так как для получения готовой продукции (при условной влажности) сейчас применяется сушка в полевых

условиях [4, 5]. Необходимо учитывать обстоятельства полного извлечения торфа из месторождения и его рационального использования [6], поэтому при проектировании участка по добыче торфа принимают во внимание все климатические, геологические и гидрогеологические условия.

При естественной сушке торфяного сырья большое значение имеют метеорологические условия. К ним можно отнести температуру и влажность воздуха, скорость ветра, облачность и прочее, причем у данных показателей широкий диапазон изменения в течение различного времени. Когда проектируется технологический процесс добычи торфяного сырья, при подборе слоя для оптимизации сушки в полевых условиях учитывают многолетние данные метеорологических факторов. Оптимальный слой, в свою очередь, зависит от глубины фрезерования и вида ножей фрезерного барабана. В течение сезона фрезерование производят на постоянной глубине, однако это негативно сказывается на добычных работах. Так, в бездождные теплые ветреные дни торфяной слой высыхает до уборочной влажности раньше установленного срока добычи. Дальше происходит пересушка. Это приводит к пылению, а в ветреные дни – к пылевым бурям, которые загрязняют прилегающие территории, из-за чего приходит в негодность готовая продукция. В итоге сокращается количество продукции в технологических циклах (происходит недобор) и не в полном объеме используются погодные условия для полевой сушки. В дождливые дни, наоборот, сушимый торфяной слой на переувлажненном подстиле не может достичь уборочной влажности до конца технологического цикла, а благоприятные погодные условия не могут быть использованы по максимуму для полевой сушки. Появляется необходимость в определении новых сроков, процесс сушки сдвигается на следующие дни. В результате уменьшается количество уборочных цикловых и сезонных сборов, установленный план по объему добычи не выполняется. Таким образом, для понижения влажности верхнего слоя залежи необходимо использовать не только сеть открытых каналов, но и прокладку закрытых дренажей. За счет этого понижается уровень грунтовых вод, происходит переменное уменьшение влажности торфяной залежи в целом [7, 8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на четырех картах производственной площадки месторождения «Святинское», которое расположено в Тверской области и сложено торфом верхового типа: магелланикумом и пушицево-сфагновым со степенью разложения 20–25 %. На двух картах был прорыт щелевой дренаж [9]. Чтобы фиксировать метеорологические параметры, использовали психрометрическую будку для определения температуры и влажности воздуха, ручной анемометр – для установления скорости ветра; проводили визуальную оценку количества облаков по 10-балльной шкале. Для контроля уровня грунтовых вод в картовых каналах были установлены линейки. Замеры проводились ежедневно. Количество выпавших осадков контролировали осадкомером Третьякова. Испарение с поверхности торфяной залежи определяли испарителем Топольницкого. Влажность торфа устанавливалась по стандартной методике с использованием сушильной установки. Щелевой дренаж с открытыми полостями был заложен на картах № 3 и 4 параллельно картовым каналам на глубину 0,9...1,2 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований было установлено, что за сезон грунтовые воды, находящиеся ниже уровня поверхности карты на 50...60 см, не повышают влажность поверхности торфяной залежи и потому не влияют на процессы полевой сушки

торфяного слоя оптимальной толщины (рис. 1). Анализ рис. 1 показывает, что после 50 см подпитка торфяного слоя отсутствует.

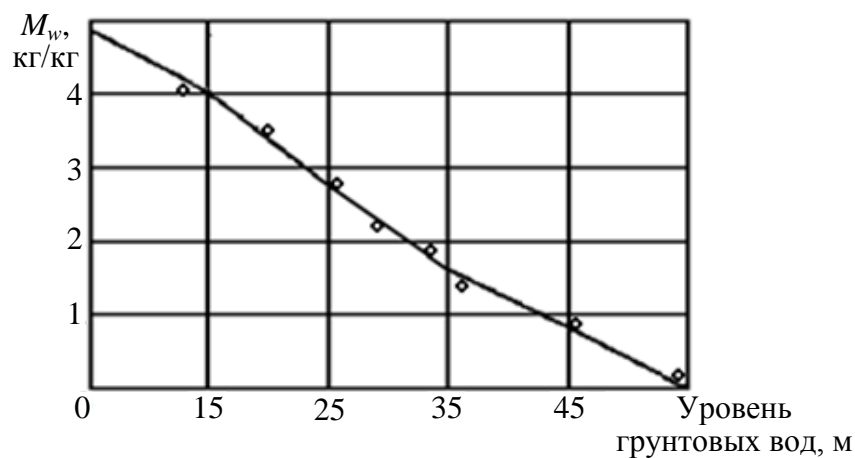


Рис. 1. Зависимость подпитывающей влаги M_w от уровня грунтовых вод

Влажность торфа в залежи относится к неустойчивому показателю и изменяется в зависимости от района расположения месторождения, температуры окружающей среды и водного режима. Очень сильно она зависит от воздействия вторичных процессов (половодья, осушения прилегающих территорий, наличия/отсутствия залесенности). Однако такой уровень грунтовых вод трудно удерживать из-за нестабильности работы открытой осушительной сети и засорения водоотводных труб. Как правило, картовые каналы полностью заполнены водой. Это удовлетворяет условиям только при производстве кускового торфа фрезформовочным способом [5, 10].

В ходе подготовки торфяного месторождения к разработке с помощью экскаваторов и специальных машин прокладывается сеть открытых каналов. У этих каналов дно имеет уклон в сторону водоприемника, они способны отводить в него воду, а также регулировать поверхностный сток вод и уровни грунтовых вод. На производственной площадке были использованы виды каналов [12, 13]:

картовый – прорыт через 20 м, использован для отвода вод в валовые каналы;

валовый – проложен перпендикулярно картовым каналам на расстоянии 500 м;

магистральный – в него текут воды из валовых;

закрытые дрены – заложены перпендикулярно картовым каналам для дополнительного отвода вод;

нагорно-пожарный – соединен с валовым каналом и устройством шлюзов для противопожарных целей.

Перед водоприемником обязательно устраивается отстойник для очистки торфяных вод. Применение дренажа с открытыми полостями позволяет быстро снизить переувлажнение торфяной залежи, но работоспособность полостей составляет один сезон, так как происходит их смыкание из-за работы оборудования. Однако эффект применения дренажа компенсирует этот недостаток.

В геотехнологии добыча фрезерным способом негативно влияет на процесс полевой сушки (увеличивается продолжительность сушки, имеет место плохое обезвоживание) и длительность технологического цикла. В связи с этим применение дренажа (рис. 2) обосновано. Так, грунтовые воды при любом виде дренажа из-за разности напоров в грунте и дрене попадают внутрь труб, либо скважин, либо открытых каналов. Далее по уклону или насосными установками они перекачиваются в сборную осушительную сеть за пределы территории месторождения.

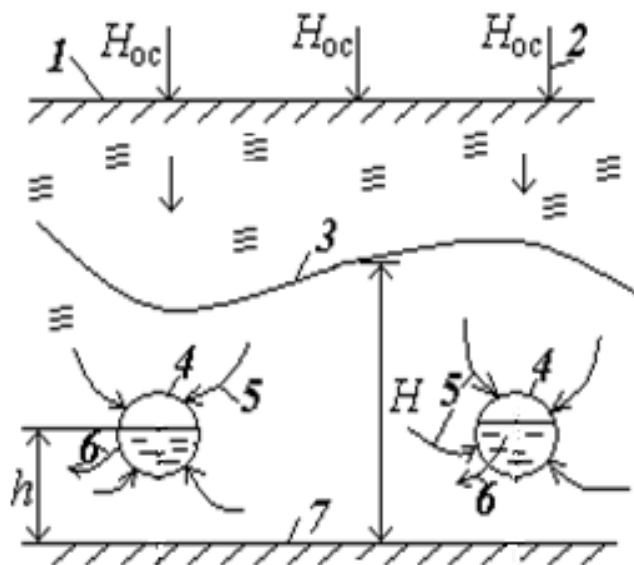


Рис. 2. Схема работы дренажа по отводу избыточных вод:
 1 – поверхность торфяной залежи; 2 – осадки; 3 – уровень грунтовых вод;
 4 – дрена; 5 – направление движения грунтовых вод (линии тока);
 6 – направление движения дренированных вод; 7 – водоупор;
 H – действующий напор; h – уровень воды в полостях; $H_{ос}$ – количество осадков, мм

Колебание уровня грунтовых вод во многом зависит от свойств торфяной залежи и граничных условий:

видов растений-торфообразователей, которые определяют ботанический состав торфа;

степени разложения, влияющей на способность поглощать и удерживать воду;

скорости поступающей инфильтрационной воды;

расположения и конструкции осушителей (каналов, скважин, колодцев), которые оказывают влияние на объем и скорость водотока;

гидрологических условий.

Протекая по открытым каналам сети и полостям дрен, свободная вода влияет на снижение уровня грунтовых вод в сушимом торфяном слое (вышележащей зоне) и тем самым обеспечивает необходимый для интенсификации сушки водно-воздушный режим. Самодвижение торфяных вод ниже уровня грунтовых вод рассматривалось как стационарный поток. Особенностью залежи при закладке дрен является способность с незначительным сопротивлением пропускать воду в любых полостях.

Сезонные наблюдения показали возможность улучшения условий полевой сушки в геотехнологии добычи фрезерным способом на производственной площадке (карты № 3 и 4) (табл. 1), где использовалась схема осушения открытой сетью каналов со щелевым дренированием. Применение комбинированной схемы позволило существенно снизить уровень грунтовых вод (рис. 3). При выпадении осадков он незначительно повышался и при этом не оказывал существенного влияния на удлинение процесса сушки и всего цикла.

Таблица 1. Влияние влажности слоя и залежи на цикловой сбор торфяной крошки в бездождный период

№ карты	Влажность торфяного слоя, %	Влажность подстила, %	Цикловой сбор, т/га
1	79,1	81,5	30,7
2	75,3	83,3	27,4
3	71,8	79,6	34,0
4	72,3	79,0	37,6



Рис. 3. Колебания уровня грунтовых вод

Необходимо уделять должное внимание подготовке карт на производственной площадке, в частности профилированию поверхности торфяной залежи.

После прекращения интенсивного выпадения осадков указанное комбинированное осушение позволяло в очень короткий период снижать уровень грунтовых вод и достигать условий, не влияющих на полевую сушку [14]. При добыче мергелей и органических сапропелей, находящихся под слоем торфяной залежи, возникают такие же особенности, влияющие на влажность сырья [15].

Тракторный профилировщик создает выпуклую поверхность карты. Это позволяет уменьшать до 2 % влажность верхнего слоя торфяной залежи. Создаются условия, при которых поверхность торфяного подстила становится практически параллельна поверхности уровня грунтовых вод, а норма осушения – одинакова на протяжении всей площади карты. В конечном итоге увеличивается сбор продукции с единицы площади, в полном объеме используются технологические параметры при сушке и уборке фрезерного торфа. Анализируя данные табл. 1, можно сделать вывод, что на хорошо спрофилированных картах (№ 1 и 4) количество убранной продукции растет.

Степень осушенности [4] торфяного слоя оценивали на основе потенциала влаги, который со временем менялся под действием физико-технических и метеорологических факторов (рис. 4), как и влажность поверхности залежи.

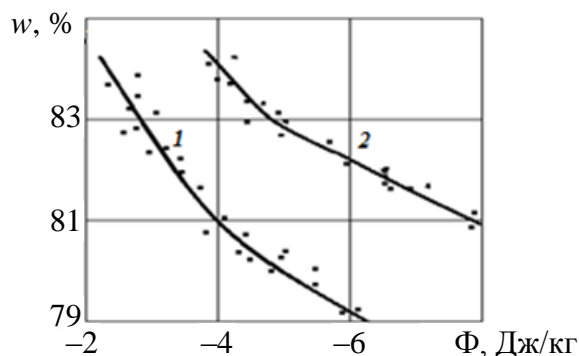


Рис. 4. Зависимость влажности w сушимого торфяного слоя от потенциала влаги Φ на картах: 1 – № 1; 2 – № 3

Непосредственное действие щелевых дрен и сети осушительных каналов понижает уровень грунтовых вод и значительно влияет на интенсивность сушимого торфяного слоя, за счет чего в нем и создается благоприятный водно-воздушный режим.

Процессы передвижения влаги в торфяной залежи позволяют оценить и обосновать мероприятия по улучшению водно-воздушного режима последней. Эти данные используются при разработке интенсивных методов осушения торфяной залежи и сохранения в ней необходимого водного режима.

На практике трудно повысить эффективную проводимость торфяной залежи, однако этого можно достигнуть заложением щелевых дрен с целью оперативного управления положением уровня грунтовых вод. Данные табл. 2 показывают, что на следующий день после дождя влажность поверхностного слоя залежи дренированием значительно снижается. По результатам исследования можно сказать, что происходит изменение влажности образцов торфа на картах с заложенными дренами. Она на 4 % меньше влажности образцов на картах только с открытой осушительной сетью (без применения дренажа), поэтому процесс полевой сушки интенсифицируется. После фрезерования залежи на картах, обустроенных щелевым дренажом, полевая сушка слоя торфяной крошки начинается с меньшей влажности, при этом сокращается время на сушку до уборочной влажности, а в конечном итоге сокращается технологический цикл.

Таблица 2. Влажность верхнего слоя торфяной залежи, сложенной магелланикум-торфом

№ карты	Влажность, %	
	Открытые каналы	Открытые каналы с дренажем
1	84,1	–
2	84,2	–
3	–	81,8
4	–	79,3

Уменьшение объемов потоков влаги в исследованиях достигнуто путем увеличения поверхностного стока и интенсификации испарения влаги с поверхности торфяной залежи. Экспериментально установлено, что на влагопроводность торфа в аэрируемой зоне не оказывают положительного действия любые достаточно крупные пустоты (дрены), так как они обычно заполнены воздухом и не способствуют перемещению влаги. Поэтому применение как вертикального, так и горизонтального

дренажа в зоне выше уровня грунтовых вод не поможет улучшить водно-воздушный режим при полевой сушке.

При добыче торфа самым распространенным способом измельчения залежи – фрезерованием – необходимо использовать функциональные возможности управления технологическими процессами. Применение щелевых дрен позволяет регулировать оптимальный водно-воздушный режим торфяной залежи, что способствует значительно быстрому снижению начальной влажности как поверхности залежи, так и сушимого слоя, а при варьировании глубины фрезерования для процесса полевой сушки можно больше высушить и добыть. На опытной производственной площадке карт № 3 и 4 снижение плотности потока торфяных вод достигалось интенсификацией поверхностного стока с поверхности и интенсификацией испарения вод, протекающих через торфяную залежь до уровня грунтовых вод и затем к каналам.

Таким образом, для повышения уровня осушенности производственных площадок на торфяном месторождении при добыче фрезерного торфа необходимо:

разрушать рыхлую структуру, способную удерживать и поглощать большое количество воды;

производить механическую переработку с уплотнением поверхности карт для формирования поверхности торфяной залежи с плохой влагопроводностью;

применять как способ обезвоживания торфа либо кратковременное переосушение залежи, либо промораживание;

осуществлять ремонт поверхности карт с хорошим профилированием по всей площади, благодаря чему образуется ровная выпуклая поверхность с уклоном в сторону картовых каналов;

переворачивать сушимый торфяной слой (хотя бы одно ворошение) для увеличения испарения с поверхности торфяной залежи, так как сухая поверхность сушимого слоя может выступать влагоизолятором и тем самым задерживать или ослаблять действие солнечной и рассеянной радиаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Уровень грунтовых вод зависит от физико-технических свойств торфяной залежи и граничных условий (гидрогеологических); скорости поступающей инфильтрационной влаги; конструкции и расположения каналов и дрен. Для снижения уровня на производственных площадках необходимо применять сеть осушительных каналов и дрен, что обеспечит на поверхности торфяного подстила необходимый водно-воздушный режим и благоприятные условия полевой сушки.

2. В геотехнологии добычи торфа фрезерным способом существенное снижение (более 1 метра) уровня грунтовых вод (когда в картовых каналах отсутствует вода) значительно уменьшает зависимость от осадков всех технологических операций. При осушении изменение уровня грунтовых вод и скорость их понижения влияют на интенсивность физико-технических процессов торфяной залежи.

3. Торфяная залежь, находящаяся ниже уровня грунтовых вод, имеет особенность – способность с незначительным сопротивлением в любой полости пропускать воду. В целях увеличения эффективной проводимости торфяной залежи и интенсификации процессов полевой сушки и добычи необходимо применять щелевой дренаж.

Таким образом, корректировка технологических параметров (возможности использования оборудования с меньшей проходимостью по мере упрочнения несущей способности поверхности производственных площадок, глубины фрезерования, расстояния между щелевыми дренами, их глубины заложения) и проектирование

адаптивной технологической схемы возможны при учете динамики изменения свойств торфяной залежи в ходе осушения. При этом существуют возможности фиксирования метеорологических параметров, технической вооруженности, а также определения затрат на обустройство осушительной сети. Выбор технологической схемы осушения на стадии проектирования позволит определить период освоения, объемы и стоимость земляных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Singh K. Allocation and sustainable management of peat resources on public land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. P. 1–14.
2. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. № 17. С. 104–107.
3. Панов В.В., Мисников О.С. Тенденции развития торфяной отрасли России // *Горный журнал*. 2015. № 7. С. 108–112.
4. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
5. Мисников О.С., Тимофеев А.Е., Михайлов А.А. Анализ технологий разработки торфяных месторождений в странах дальнего и ближнего зарубежья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 9. С. 84–92.
6. Мисников О.С., Тимофеев А.Е. О рациональном использовании энергетических и минеральных ресурсов торфяных месторождений // *Горный журнал*. 2008. № 11. С. 59–63.
7. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. М.: Недра. 1992. 288 с.
8. Чураев Н.В. Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах // *Доклады Академии наук*. 1963. Т. 148. № 6. С. 1361–1364.
9. Купорова А.В., Пухова О.В., Ермияш Д.М. Направления осушения месторождений в геотехнологиях торфа и сапропеля // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 11. С. 36–40.
10. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.
11. Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ. 2015. 160 с.
12. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological approaches to reducing the loss of peat raw materials in fields with hydrological regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.
13. Кремчеев Э.А. Обоснование технологических приемов снижения влажности торфяного сырья при экскаваторной добыче // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 9. С. 31–35.
14. Воларович М.П., Чураев Н.В., Гамаюнов Н.И., Афанасьев А.Е. Исследование механизма сушки капиллярно-пористых тел различной структуры индикаторным методом // *Тепло- и массоперенос*. В 11 т. Киев: Наукова думка. 1968. Т. 6. Ч. 1. С. 30–43.
15. Мисников О.С. Физические процессы структурообразования при сушке погребенных сапропелей. Дисс... канд. техн. наук. Тверь. 1997. 20 с.

Для цитирования: Пухова О.В. Оценка влияния технологических параметров на полевую сушку торфяного слоя при его добыче // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 53–61.

ASSESSMENT IMPACT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR FIELD DRYING OF THE PEAT LAYER DURING ITS EXTRACTION

O.V. PUKHOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: owpuhova@mail.ru

The questions of the influence of technological parameters (water level, weather), which depend on the rate of drying of products, in the development of the peat field “Svyatinskoye”, and, more precisely, in the field drying of peat crumb obtained by milling the deposit, are considered. For the experimental maps of the production site the indicators of seasonal studies are given. For this purpose, the moisture content of the dried layer, indicators of groundwater level fluctuations and the volume of moisture, which was absorbed from the underlying deposit and rainfall, moistening the dried peat layer, were determined. On four maps with an open drainage network, weather conditions as well as groundwater level fluctuations in the map channels were monitored during the season. The complexity of laying of slot drainage and its influence on the water-air regime of the uppermost deposit during the ground water level variation during the season were analyzed. It is shown that slot drainage together with open channels has favorable effect on production site drainage. It has been established that ground waters under the action of gravitational forces, i.e. at the difference of pressures in the peat deposit and drains, seep into the cavity and then under the slope are discharged into the collecting network of open channels and are removed outside the drained production site. It is recommended to use the results of seasonal studies and analysis of moisture movement processes to develop and substantiate measures for improving the water-air regime of the peat deposit with the development of an intensive method of drainage as well as for maintaining the necessary conditions.

Keywords: peat, peat deposit, peat layer, open drainage network, drainage, meteorological indicators, hydrological regime, groundwater level, drying processes.

Поступила в редакцию/received: 25.04.2023; после рецензирования/revised: 15.05.2023;
принята/accepted: 18.05.2023

АММОНИЗАЦИЯ ТОРФА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Е.Ю. ЧЕРТКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lastochka-w@mail.ru

© Черткова Е.Ю., 2023

Приведены результаты исследований, связанных с внесением аммиака в торф для получения торфоаммиачного удобрения. Предложен способ внесения раствора аммиачной воды в полевых условиях перед операцией валкования. Для этих целей добавлены конструктивные изменения в валкователь, который применяется на торфяном месторождении в технологии добычи фрезерного торфа.

Ключевые слова: торф, водный аммиак, азот, гуминовые кислоты, емкость поглощения, кислотность, удобрение, модернизация, способ внесения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-62-70

ВВЕДЕНИЕ

На территории России площадь пахотных земель составляет около 120 млн га. Содержание гумуса в них за прошедшие 20 лет, по оценкам независимых экспертов, снизилось до 20 % [1, 2]. Основными источниками насыщения питательными элементами в почве являются удобрения. В последние десятилетия они не вносились на территории около 41 млн га [1]. Для удовлетворения 25 % потребностей в органических удобрениях необходимо обеспечить добычу торфяного сырья не менее 300 млн т в год (из расчета минимальной дозы внесения 10 т/га) [3].

Органические удобрения являются важным средством улучшения физических свойств и водно-воздушного режима бедных гумусом и питательными веществами почв, а также дополнительным источником питательных веществ для растений и стимулятором биологических процессов [4].

Предприятия по добыче торфа в России производят несколько видов торфяных удобрений. Для этого практикуют дополнительную обработку торфяной крошки. Торфяные удобрения отличаются друг от друга технологическими схемами производства и составом вносимых компонентов. Технологии производства торфяных удобрений разделяются на заводские и полевые.

По данным источников [4–6], можно выделить три основных способа аммонизации торфа в полевых условиях. Первый – добавление аммиака в процессе добычи фрезерного торфа. Второй способ – внесение аммиака непосредственно в штабеля фрезерной крошки. Третий способ – внесение аммиака специальным устройством в цикловые навалы в течение всего сезона добычи фрезерного торфа. Производство можно организовать с применением машин или сельскохозяйственной техники [7, 8].

При фрезерном способе разработки добыча торфяной крошки включает комплекс операций, таких как фрезерование, ворошение, валкование, уборка и штабелирование. При фрезеровании измельчается (фрезеруется) верхний слой торфяной залежи глубиной до 50 мм. С точки зрения фракционного состава для торфяных удобрений наиболее приемлемым является торфяная крошка. Л.Р. Пивоваров и А.В. Тишкевич установили, что в процессе аммонизации

наибольшей поглотительной способностью обладают частицы торфа размером до 5 мм [4, 5, 9].

Сушка сфрезерованного слоя торфа осуществляется на поверхности разрабатываемой площади торфяных полей. Чтобы интенсифицировать процесс сушки торфа, применяют специальные машины – ворошилки. Подсушенную торфяную крошку собирают валкователем в валки и затем уборочными комплексами отгружают в штабеля. Для достижения наилучшего эффекта от торфяных удобрений используемый торф должен быть подсушен до влажности 55...60 %. При этой влажности в нем наиболее активно протекают полезные микробиологические процессы [5, 10]. На площадях после уборки фрезерной крошки производится фрезерование следующего слоя торфяной залежи, торф сушат и убирают в штабеля. Операции цикличны. Длительность цикла при производстве торфа для сельского хозяйства составляет около двух суток в зависимости от погодных условий [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Торф в естественных условиях характеризуется слабой биологической активностью. Многие виды торфа содержат значительное количество азота, который находится в труднодоступных для растений гуминовых веществах, битумах, лигнине и других соединениях [5, 11].

Многочисленные исследования активизации азота торфа и получения на его основе высокоэффективного удобрения проводились в разные годы XX века такими учеными, как С.С. Драгунов, Л.А. Христева, А.В. Тишкович, Д.Н. Прянишников и др. [4, 5].

К основным методам активизации азота торфа относятся [4–7]:

- а) внесение в торф аммиачной воды или безводного аммиака;
- б) компостирование торфяной крошки с органическими и минеральными компонентами;
- в) разогревание.

Аммонизация торфа – это процесс насыщения торфяной крошки водным или безводным аммиаком.

В настоящей статье рассмотрим процесс внесения водного аммиака во фрезерный торф для получения торфоаммиачного удобрения. Для аммонизации исходный торф должен соответствовать следующим требованиям [9]: степень разложения – не менее 15 %, зольность – не более 25 %, кислотность (рН) – в пределах 3,5...6,0.

Органическое вещество торфа состоит из углерода, водорода, кислорода, серы и азота. Для торфа в целом содержание указанных элементов находится в пределах 48...65 % С; 4,7...7,3 % Н; 0,02...1,2 % S; 0,5...4 % N; 24,7...45,2 % О [11]. Сложный состав органического вещества определяет и сложность форм связи торфа с аммиаком. При контакте фрезерной крошки с аммиачной водой происходят определенные процессы. С одной стороны, имеют место чисто физические процессы растворения и диффузия аммиака в воде влажного торфа, а также его адсорбция на высокоразвитой поверхности торфа; с другой стороны, раствор аммиака в воде диспергирует коллоидальное вещество торфа и в результате гидролиза расщепляет сложные молекулы органического вещества торфа, образуя одновременно аммиачные соли [5, 12].

При производстве торфяных удобрений аммиачная вода вводится в нормах согласно техническим условиям, т.е. емкость поглощения 1 т торфа с массовой долей

влаги 55 % для водного аммиака – не менее 20 кг, жидкого аммиака – не менее 5 кг [9]. Емкостью поглощения торфом аммиака называют количество аммиака, которое фрезерный торф может поглотить и удержать без потерь в обменно-поглощенной форме [12].

Определение массовой доли общего азота в аммонизированном торфе дает полное представление о емкости поглощения аммиака, так как в этом случае учитываются аммиачный азот в обменно-поглощенном состоянии и та часть аммония, которая может быть более прочно удержана органическим веществом и находится в необменной форме.

В водном растворе аммиачный азот находится в двух формах: в виде свободного аммиака NH_3 и катиона аммония NH_4^+ , причем свободного аммиака содержится значительно больше, чем катиона аммония [12]. Наличие в водном растворе большого количества свободного аммиака может приводить к потерям аммиачного азота, величина которых будет определяться не только правильно установленной дозой, но и способом введения в торф аммиачной воды. Торф для сельскохозяйственного использования аммонизируется при операции добычи или в период его хранения на полях [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является торфяное месторождение, расположенное во Владимирской области. Залежь относится к верховому типу, сложена преимущественно пушицево-сфагновым торфом со степенью разложения – 24 %; зольностью – 3 %.

Были проведены исследования по изучению взаимодействия аммиака аммиачной воды с торфом, отобранным с этого месторождения, в зависимости от влажности сырья, кислотности.

Для исследования влияния влажности торфа на поглощение аммиачной воды брали образцы торфа из залежи и подсушивали их в лаборатории до влажности 40, 50, 60, 70 %. Во всех навесках торфа принималось одинаковое количество сухого вещества. Каждая навеска обрабатывалась аммиачной водой до полного насыщения [12], а затем подвергалась анализу на содержание в торфе аммиачного азота в миллиграммах на 100 г абсолютно сухого вещества с последующим пересчетом в процентные доли. Результаты исследования представлены ниже:

Влажность исходного торфа, %	40	50	60	70
Емкость поглощения торфом аммиака в пересчете на абсолютно сухое вещество, %	1,96	2,02	1,93	1,97

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что количество поглощенного торфом аммиачного азота в пересчете на абсолютно сухое вещество во всех пробах получилось практически одинаковое (показатель отличается на 2...5 %) для одного вида торфа при разных показателях влажности. Результаты наших исследований подтверждаются исследованиями, проведенными в 50–70-х годах XX века [4, 5].

Аммиак удерживается торфом в результате физико-химических процессов. Следует также учитывать, что при подсушивании аммонизированного образца до влажности 12...15 % к потерям относится и та часть аммиачного азота, которая находится в состоянии физической сорбции, т.е. сосредоточена и удерживается в пленке водного раствора, окружающего частицы торфа. В этом можно убедиться при определении количества поглощенного торфом азота после высушивания образца до

постоянной массы. В процессе высушивания аммонизированного торфа при 105 °С в сушильном шкафу вместе с гигроскопической влагой теряется 8...30 % аммиачного азота (от найденного в воздушно-сухом торфе). Результаты представлены на графике емкости поглощения аммиачного азота верховым торфом (в воздушно-сухом состоянии) (рис. 1).

При изучении форм азота в аммонизированном торфе выявлено, что в результате взаимодействия водного раствора аммиака с торфом протекает ряд весьма сложных процессов: одновременно с обменным характером поглощения имеют место другие химические реакции между ионом аммония и органическим веществом торфа [5, 7, 13].

При насыщении верхового торфа (степень разложения 24 %) водным раствором аммиака было отмечено, что с увеличением концентрации от 1,2 до 10,3 % (рис. 1) повышается и содержание поглощенного аммиачного азота в воздушно-сухом торфе.

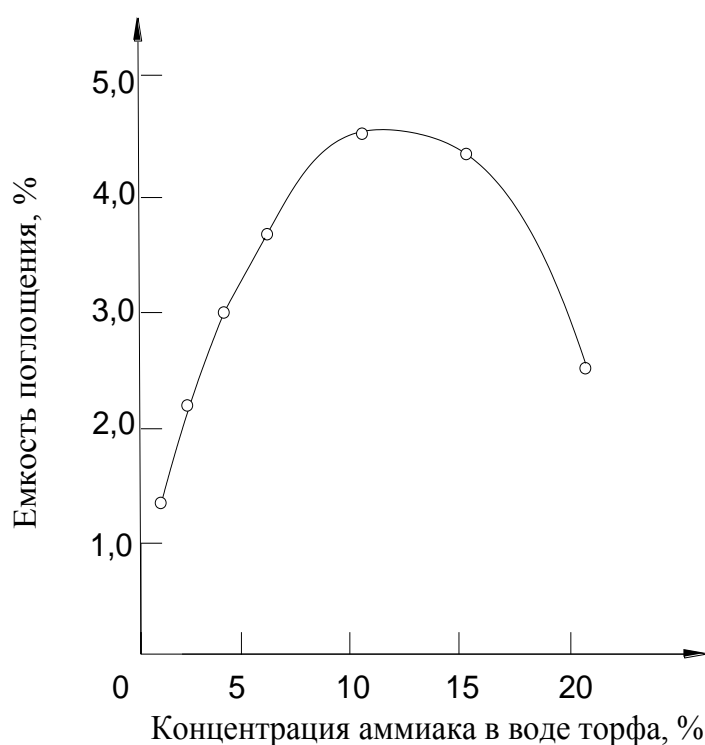


Рис. 1. Емкость поглощения аммиачного азота верховым торфом (в воздушно-сухом состоянии)

Тем не менее при дальнейшем повышении концентрации аммиака в растворе (14,5...20 %) наблюдается заметное уменьшение количества поглощенного торфом аммиачного азота. Эта закономерность была отмечена в предыдущих опытах с образцами торфа других видов [4]: с повышением концентрации аммиака в растворе увеличивается количество поглощенного азота до 10...15 %; при дальнейшем повышении концентрации аммиака содержание поглощенного торфом аммония значительно сокращается.

Оценка поглотительной способности торфа по отношению к аммиаку имеет большое практическое значение, поскольку служит основным критерием для установления дозы аммиачной воды при производстве концентрированных удобрений. Этот способ приводит к изменению биохимических и агрохимических свойств фрезерного торфа. Происходит увеличение содержания подвижных органических

веществ в 10...15 раз за счет водорастворимых гуматов аммония [4, 5, 11], вследствие чего улучшаются свойства торфа.

Емкость поглощения торфом водного аммиака в зависимости от показателя кислотности (pH_0) показала, что по мере увеличения кислотности наблюдается тенденция к увеличению поглощения аммиачного азота в связи с изменением ионообменной активности групп (по данным С.С. Драгунова и др.) [4]. Для определения уравнения регрессии, характеризующего форму связи между кислотностью и емкостью поглощения, применяли метод наименьших квадратов [14].

Получено эмпирическое уравнение регрессии:

$$y = 5,86 \cdot x^{-0,804},$$

где y – емкость поглощения торфом аммиака аммиачной воды, %; x – кислотность торфа (pH) в условных единицах.

Эмпирические линии регрессии и вид функциональной зависимости между исследованными показателями представлены на рис. 2.

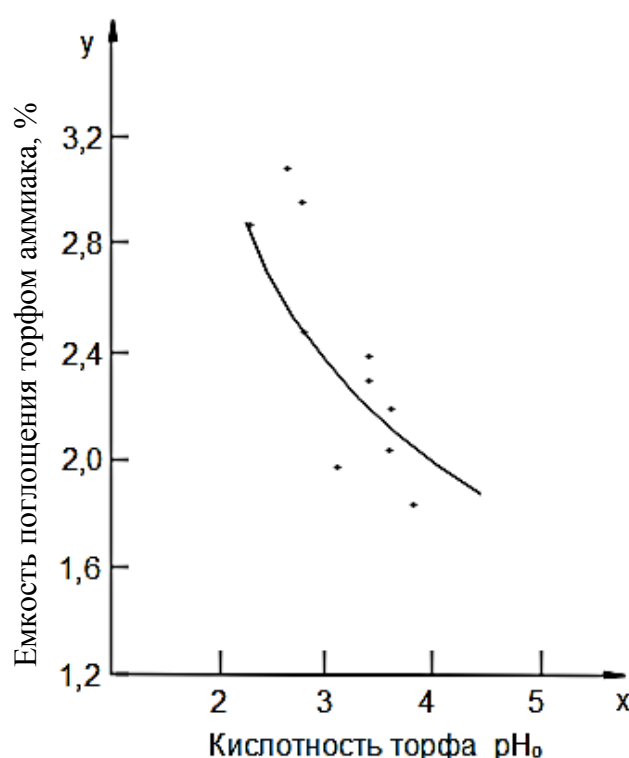


Рис. 2. Зависимость емкости поглощения водного аммиака торфом от кислотности торфа

Для определения тесноты связи между кислотностью торфа pH_0 и емкостью поглощения им аммиака аммиачной воды был подсчитан коэффициент нелинейной регрессии и установлено корреляционное отношение [16]. Коэффициент регрессии для связи pH_0 $\eta_{y/x} = 0,926$, а корреляционное отношение $\eta_{y/x} = 0,752$, что указывает на достаточную связь между исследуемыми показателями. Чем выше показатель кислотности используемого торфа при постоянной кислотности среды, тем больше количество ионов аммония им поглощается.

Производство аммиачного удобрения будет определяться не только правильно установленной дозой, но и способом введения в торф аммиачной воды.

После анализа источников [4, 5] (в которых рассмотрены способы внесения водного раствора аммиака), оборудования для приготовления аммиачного удобрения на основе торфа в полевых условиях, информации по смежному направлению в сельском хозяйстве [8], а также зависимости емкости поглощения от влажности и кислотности был предложен способ внесения раствора аммиачной воды в полевых условиях перед операцией валкования. В технологическом процессе проходят три этапа усреднения торфа и аммиака: первый – усреднение в процессе валкования, второй – в процессе уборки, третий – во время штабелирования. Использование предлагаемого технического решения позволит повысить качество аммонизации торфа за счет более равномерного внесения аммиака. Кроме того, применение предлагаемой машины даст возможность избежать потерь водного раствора аммиака.

Весь технологический процесс добычи торфа на месторождении остается неизменным, кроме операции валкования, что играет большую роль, так как предприятию не понадобится дополнительно вкладывать средства в изменение всего технологического процесса.

Для реализации технологии получения торфоаммиачного удобрения предлагаем модернизировать применяемый на данном предприятии валкователь типа ТВА-09. Такую модернизацию возможно осуществить в условиях механических мастерских на торфяных производствах.

Валкователь (рис. 3) оснащается цистерной (контейнером), чтобы обработка шла в расстил перед операцией валкования.

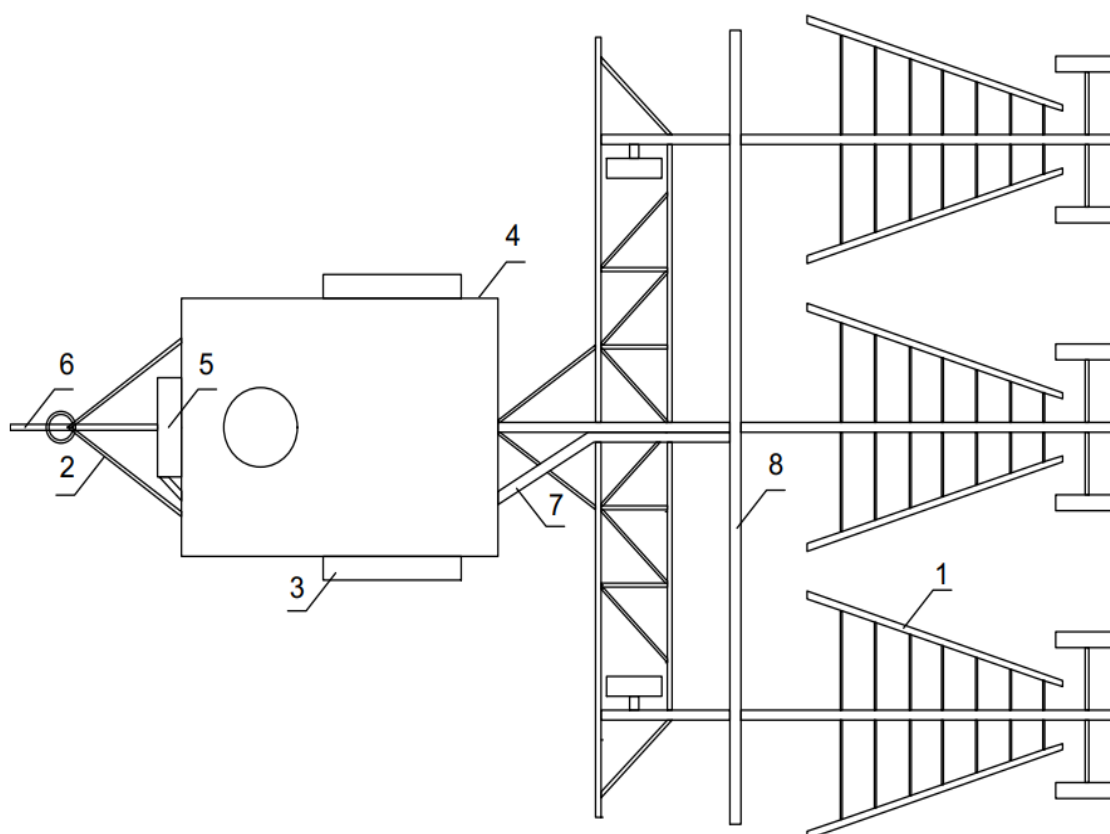


Рис. 3. Валкователь с оборудованием для внесения удобрения: 1 – секция валкователя; 2 – рама; 3 – ходовая часть; 4 – цистерна; 5 – насос-дозатор; 6 – вал отбора мощности; 7 – шланг подачи водного аммиака; 8 – рабочий орган

Особенностью данного решения является то, что внесение аммиака производится непосредственно в расстил торфа перед операцией валкования, благодаря чему происходит первое перемешивание (усреднение) торфа с раствором аммиака. К тому же внесение аммиака не по всей ширине захвата секции валкователя, а только по краям исключает середину, где будет основание валка (рис. 4), за счет чего снижаются потери аммиака.

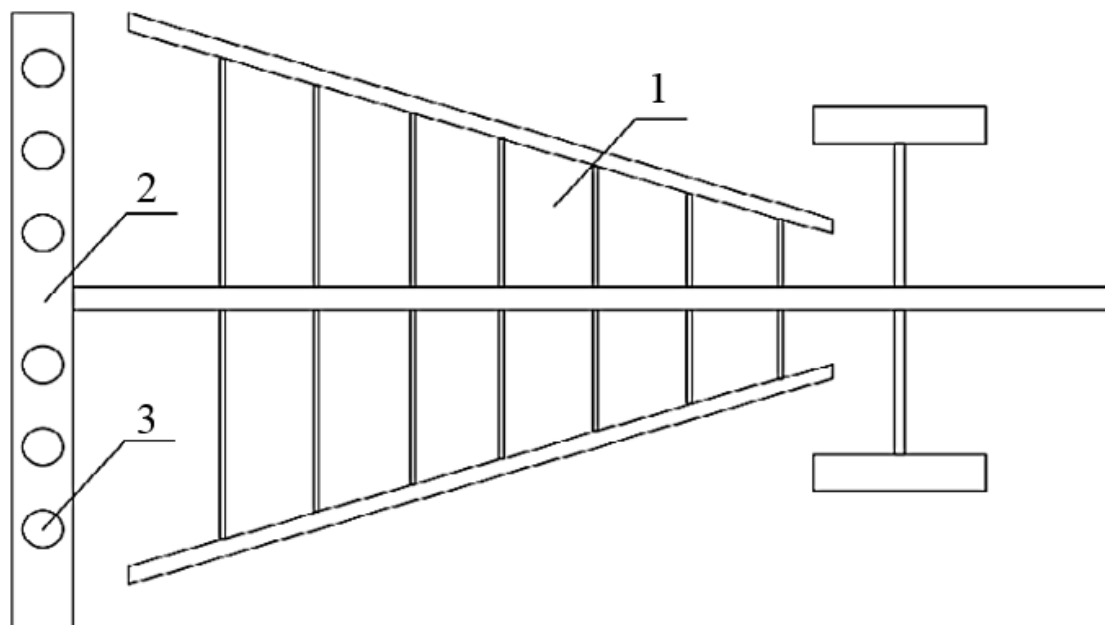


Рис. 4. Рабочий орган: 1 – секция валкователя; 2 – рабочий орган; 3 – выпускные отверстия (фарсунки)

Интервал в 1–2 часа между операциями валкования и уборки в штабеля способствует лучшему взаимодействию аммиака с торфом, так как оно происходит на протяжении определенного времени [4]. При этом значительно сокращаются потери аммиака, а сам он равномерно распределяется по сечению штабеля. Аммонизированный торф выдерживают в штабеле 1,5...2 месяца [5], а затем отгружают потребителю как готовое торфоаммиачное удобрение. Чтобы сократить потери, связанные с намоканием (которое зависит от длительности хранения и общего количества выпавших за это время осадков), штабель следует изолировать полиэтиленовой пленкой [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги исследования:

1. Роль аммиачной воды при внесении ее в торф сводится к обогащению торфа подвижными формами азота, нейтрализации кислотности, повышению содержания водорастворимых гуминовых веществ, активизации азота торфа [4].

2. Норма аммиачной воды не должна превышать величину максимальной емкости поглощения, поскольку введение избыточного количества аммиака приведет к неизбежным потерям азота в результате улетучивания непоглощенной части аммиака.

3. Аммиачный азот полностью удерживается влажным торфом, но при последующем подсушивании аммонизированных образцов до воздушно-сухого состояния (влажностью 13...15 %) потери аммиачного азота составляют 14...19 %.

Обработка торфа возрастающими концентрациями аммиака показала, что с увеличением концентрации содержание поглощенного аммония увеличивается только до конкретного предела. Дальнейшее увеличение концентрации (более 15 %) приводит к уменьшению количества аммиачного азота, удерживаемого торфом.

4. Была предложена новая схема внесения аммиачной воды в торф, предполагающая ее равномерное распределение за счет неоднократного перемешивания массы до момента вывозки с полей торфоаммиачного удобрения.

5. Для реализации технологии получения торфоаммиачного удобрения была предложена модернизация валкователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлова Г.С. Экономическое регулирование использования минеральных удобрений // *Экономист*. 2010. № 1. С. 76–84.

2. Singh K. Allocation and Sustainable Management of Peat Resources on Public Land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. P. 1–14.

3. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.

4. Торф на удобрение / А.В. Тишкович [и др.]; под ред. С.Г. Скоропанова. Минск: Наука и техника, 1983. 103 с.

5. Крупнов Р.А., Базин Е.Т., Попов М.В. Использование торфа и торфяных месторождений в народном хозяйстве: учеб. пособие / под ред. Е.Т. Базина. М.: Недра. 1992. 232.

6. Миронов В.А., Горячев В.И., Зюзин Б.Ф. Торф и повышение плодородия почв // *Труды Инсторфа*. 2014. № 10 (63). С. 34–39.

7. Гамаюнов С.Н., Мисников О.С., Диченский А.В. Обоснование использования ресурсов торфяных месторождений Тверского региона для производства органических удобрений // *Болота и биосфера: Материалы Всероссийской с международным участием X школы молодых ученых*. Тверь: Научное издание технологий. 2018. С. 22–30.

8. Использование торфоминеральных мелиорантов в рекультивационных работах и для улучшения плодородия почв / О.С. Мисников [и др.] // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Материалы 16-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики*. Тула: ТулГУ. 2020. С. 167–175.

9. ГОСТ Р 51661.5-2000. Удобрения торфяные для сельского хозяйства. Технические условия. М.: Издательство стандартов. 2001. 11 с.

10. Столбикова Г.Е., Мисников О.С., Иванов В.А. Процессы открытых горных работ. Фрезерный торф: учеб. пособие. Тверь: ТвГТУ. 2017. 160 с.

11. Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства: учеб. пособие. Тверь: ТвГТУ. 2015. 168 с.

12. ГОСТ 27894.2-88. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения емкости поглощения торфом аммиака. М.: Издательство стандартов. 1989. 5 с.

13. Гуминовые вещества торфа: физико-химические свойства и перспективы применения / И.И. Лиштван [и др.] // *Природопользование: сборник научных трудов*. Минск: Институт природопользования НАН Беларуси. 2012. Вып. 22. С. 92–95.

14. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра. 1991. 240 с

15. Stolbikova G.E., Chertkova E.Yu. Peat Storage Losses Investigation // *E3S Web of Conferences. The Second Interregional Conference «Sustainable Development of Eurasian Mining Regions»*. 2021. V. 278. P. 01001.

Для цитирования: Черткова Е.Ю. Аммонизация торфа в полевых условиях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 62–70.

FIELD AMMONISATION OF PEAT

E.Yu. CHERTKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: lastochka-w@mail.ru

The results of research related to the application of ammonia to peat to produce a peat-ammonia fertilizer are presented. The method of introducing ammonia water solution in the field before the swathing operation is proposed. For this purpose, constructive changes are made to the rake, which is used at the peat field in the technology of milled peat extraction.

Keywords: peat, aqueous ammonia, nitrogen, absorption capacity acidity, fertilizer, modernization, application method.

Поступила в редакцию/received: 24.04.2023; после рецензирования/revised: 15.05.2023;
принята/accepted: 19.05.2023

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

К.Б. ФАМ, асп., П.М. МУРАШЕВ асп., В.Н. БОГАТИКОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

© Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., 2023

В работе описаны проектирование и моделирование с использованием MatLab и Simulink процесса сушки зеленого чая в конвейерно-ленточной сушилке при нечеткой аппроксимации зависимости равновесной влажности чая от его относительной влажности и температуры. На основе сравнения расчетных кривых по разработанной модели, а также на базе имеющихся экспериментальных данных о сушке зеленого чая в конвейерной сушилке сделан вывод об их удовлетворительной сходимости. Полученные модели рекомендованы для практического применения.

Ключевые слова: сушка зеленого чая, теория нечетких множеств, математическая модель сушки, равновесная влажность, влажность зеленого чая.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-71-83

ВВЕДЕНИЕ

Широко известный напиток чай популярен во всем мире благодаря своим лечебным свойствам [1]. Важным элементом в нем являются полифенолы, которые представляют собой тип микроэлементов, способствующих улучшению здоровья человека. Они также присутствуют во многих овощах и фруктах. Растительные полифенолы богаты антиоксидантами, которые помогают остановить вредоносное действие свободных радикалов и предотвратить повреждение клеток, снижая таким образом риск развития хронических заболеваний. Полифенолы выполняют и множество других полезных функций: от контроля уровня сахара в крови до уменьшения риска образования тромба [2]. Кроме того, положительное влияние на организм чай оказывает при ожирении, микробном атеросклерозе и раке, включая рак толстой кишки, простаты, легких, молочной железы и кожи.

Чтобы потребитель получил качественный чайный продукт, свежие листья зеленого чая должны пройти множество сложных стадий обработки, и одним из важных этапов является сушка. Она не только способствует продлению срока хранения и предотвращению роста вредных химических веществ, но и придает листьям правильные форму, цвет и вкус.

Математическое описание процесса сушки основано на использовании дифференциальных уравнений теплопроводности. При синтезе таких уравнений необходимо учитывать массообменные процессы, процессы теплопроводности и теплообмена. Математическое описание подобных процессов в большинстве своем носит нелинейный характер, обусловленный как неопределенностью в знаниях о параметрах самих процессов, так и нелинейностью их взаимосвязей. Поэтому при

решении дифференциальных уравнений математического описания обычно возникают определенные трудности. Чтобы справиться с ними, в настоящей работе использовали результаты экспериментов, инженерные опыты и теорию нечетких множеств [3].

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Схематический вид конвейерно-ленточной сушилки для зеленого чая представлен на рис. 1. Вначале воздух поступает в подогреватель, а затем, после достижения необходимой температуры, уже горячий воздух в сушильной камере контактирует с чаем, обеспечивая тепло для испарения влаги. В процессе сушки воздух движется с большой скоростью, поэтому часть чая будет выдуваться вместе с воздухом из сушильной камеры. Для извлечения этой части продукта на выходе ставится циклон. Из сушильной камеры воздух поступает в циклон для отделения частиц чая. Затем отработанный воздух выбрасывается в окружающую среду, а сухие материалы смешиваются с готовым продуктом.

Зеленый чай с повышенной влажностью подается в сушильную камеру по конвейеру, движется по конвейерной ленте перпендикулярно направлению движения горячего воздуха и получает тепло непосредственно от него в процессе сушки.

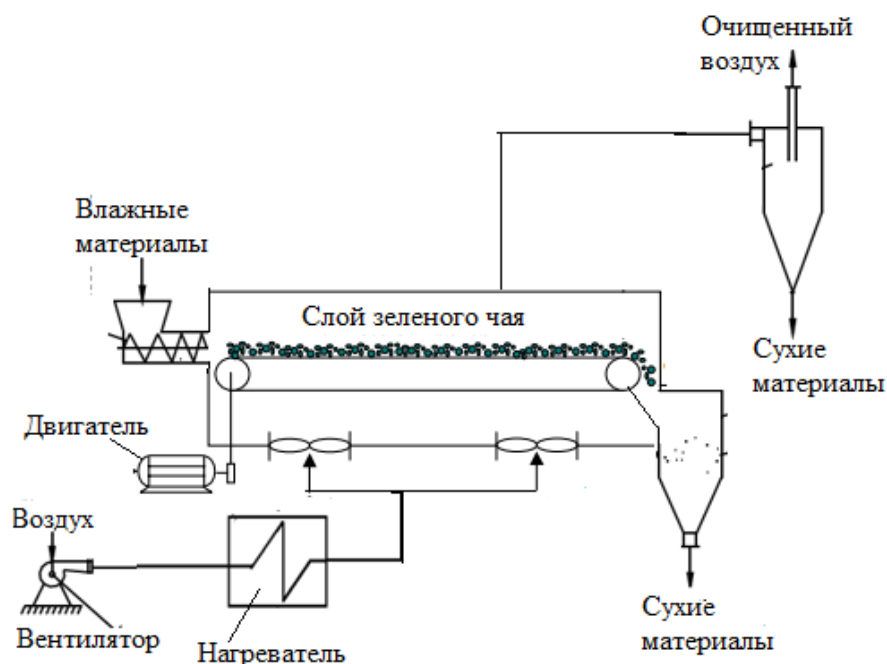


Рис. 1. Технологическая схема сушки зеленого чая

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическое описание конвейерной сушилки с непосредственным контактом включает уравнения балансов массы и энергии твердой и газовой фаз, которые связаны с временем удерживания [4] и моделями теплообмена.

Предлагаемая динамическая модель имеет важные упрощения:

- 1) зеленый чай представляет собой пористый материал, включающий жидкую и твердую фазы;
- 2) перенос массы и тепла представляет собой комбинацию одновременных внутренних и внешних конечных сопротивлений;
- 3) усадка чая не влияет на скорость сушки.

Уравнение материального баланса в зеленом чае:

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = -v_s \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} - K(M(x,t) - M_e), \quad (1)$$

где M – влажность листьев зеленого чая, кг/кг; v_s – скорость движения ленты, м/с; K – коэффициент массообмена, кг/(м²·с); M_e – равновесная влажность листьев чая, кг/кг.

Уравнение энергетического баланса:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -v_s \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} - \frac{K(M(x,t)-M_e)}{C_{ps}+C_{pw}M(x,t)} \left(C_{pv}(T_c - T(x,t)) + \lambda + C_{pw}T(x,t) \right) + \frac{h(T_c-T(x,t))}{C_{ps}+C_{pw}M(x,t)}, \quad (2)$$

где T – температура слоя зеленого чая, °С; T_c – температура воздуха, °С; h – коэффициент теплопередачи, описывающий конвективный поток тепла от воздуха к листьям, Вт/(м²·°С); λ – скрытая теплота испарения воды, Дж/кг.

В уравнении (2) C_{ps} , C_{pw} и C_{pv} – удельные теплоемкости листьев, жидкой воды и водяного пара соответственно. Значения C_{ps} листьев чая измеряли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC Q2000, TA Instruments). Средние значения были равны 1 720 Дж/(кг·°С). Коэффициент массообмена в уравнениях (1) и (2) менялся по времени, он зависит от скорости воздуха и его температуры [3] в камере и вычисляется по уравнению

$$K = 10^{-6} T_c^{2,08} (v_a)^{1,11}, \quad (3)$$

где v_a – скорость сушильного воздуха, м/с.

При решении дифференциального уравнения в частных производных чаще всего применяется метод конечных разностей (МКР) [5]. Сущность МКР заключается в том, что производится разбиение области интегрирования. Затем для каждой отдельной области вместо дифференциальных уравнений выполняется замена их конечно-разностными аналогами. Таким способом получают систему линейных алгебраических уравнений для определения локальных значений температуры и влажности в каждом узле сетки. Конечно-разностное решение для разработанной системы уравнений (материального (см. формулу (1)) и теплового (см. формулу (2))) выполняется на однородной сетке с количеством разбиений по длине камеры сушилки i и по времени j . Сетка для расчетной области $[0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T]$ имеет постоянный шаг как по пространственной координате $\Delta x = L/N$, так и по времени $\Delta t = T/M$ (рис. 2).

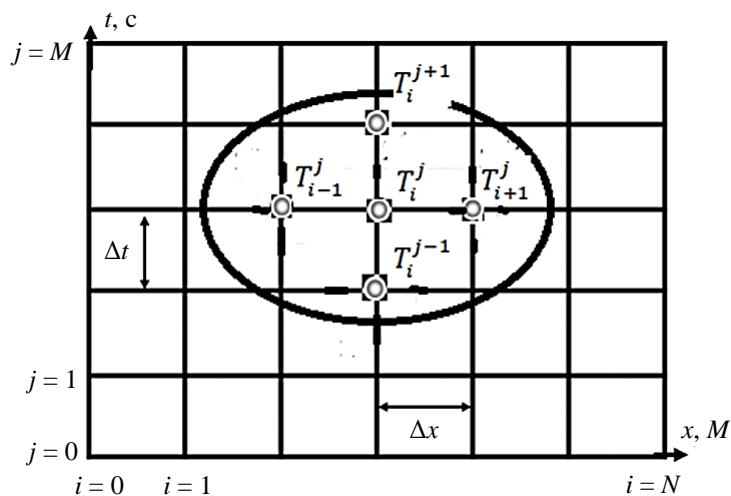


Рис. 2. Сетка для расчетной области

Для нахождения температуры листьев зеленого чая в процессе сушки в моменте времени $(j + 1)$ необходимо иметь решение в моменте j . Производные от функций $T(x, t)$ и $M(x, t)$ по времени и длине слоя зеленого чая в приведенном выше дифференциальном уравнении теплопроводности представляются конечно-разностным методом следующим образом:

$$\left(\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial t}\right)_i \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}; \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}\right)_j \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x}; \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial M(x, \tau)}{\partial t}\right)_j \approx \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t}; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial M(x, \tau)}{\partial x}\right)_i \approx \frac{\Delta M}{\Delta x} = \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta x}. \quad (7)$$

Поставим выражения (4)–(7) в уравнения (1)–(2) и проведем преобразование полученных формул. В результате получим основную систему конечно-разностных уравнений для прогнозирования изменений температуры и влажности чайных листьев в течение процесса:

$$\begin{cases} \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} = -v_s \frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta x} - K(M_i^j - M_e); \\ \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = -v_s \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} - \frac{K(M_i^j - M_e)}{C_{ps} + C_{pw}M} (C_{pv}(T_c - T_i^j) + \lambda + C_{pw}T_i^j) + \frac{h(T_c - T_i^j)}{C_{ps} + C_{pw}M}. \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотренный тип сушилки в работе – конвейерный, поэтому можно сказать, что значения температуры и влажности слоя зеленого чая в одной точке практически не изменяются, особенно при незначительном выбранном интервале по координате (Δx). Систему дифференциальных уравнений для прогнозирования изменений качества продукта можно переписать в виде

$$\begin{cases} v_s \frac{M_{i+1} - M_i}{\Delta x} = -K(M_i - M_e); \\ v_s \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} = -\frac{K(M_i - M_e)}{C_{ps} + C_{pw}M} (C_{pv}(T_c - T_i) + \lambda + C_{pw}T_i) + \frac{h(T_c - T_i)}{C_{ps} + C_{pw}M}. \end{cases} \quad (9)$$

Из решения данной системы уравнений получим выражения для прогнозирования изменений температуры и влажности в сушилке:

$$\begin{cases} M_{i+1} = M_i + \frac{f_1(M_i, T_i)\Delta x}{v_s}; \\ T_{i+1} = T_i + \frac{f_2(M_i, T_i)\Delta x}{v_s}, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} f_1(M_i, T_i) &= -K(M_i - M_e(M_i, T_i)); \\ f_2(M_i, T_i) &= -\frac{K(M_i - M_e)}{C_{ps} + C_{pw}M} (C_{pv}(T_c - T_i) + \lambda + C_{pw}T_i) + \\ &\quad + \frac{h(T_c - T_i)}{C_{ps} + C_{pw}M}. \end{aligned}$$

Основные теплофизические характеристики зеленого чая представлены в табл. 1.

Таблица 1. Тепловые параметры процесса сушки зеленого чая

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Удельная теплоемкость жидкой воды	C_{pw}	4 220	Дж/(кг·°С)
Удельная теплоемкость водяного пара	C_{pv}	2 200	Дж/(кг·°С)
Коэффициент теплопередачи	h	181	Вт/(м ² ·°С)
Скрытая теплота испарения воды	λ	2 300	Дж
Температура окружающей среды	T_0	20...25	°С
Начальная влажность	M_0	60...70	%

В уравнениях (1) и (2) имеется равновесное содержание влаги (M_e) зеленого чая, которое является неизвестной характеристикой. Для определения данного параметра была проведена серия из пятнадцати экспериментов по изучению влияния основных рабочих параметров на равновесную влажность чайного листа. В табл. 2 приведены экспериментальные данные M_e , полученные путем варьирования значений относительной влажности (M) и температуры (T) на пяти и трех уровнях соответственно. Повторные анализы образцов для определения равновесного содержания влаги привели к низким значениям среднеквадратического отклонения (СКО), что подтверждает надежность экспериментальной методики. Вся экспериментальная процедура повторялась дважды в идентичных рабочих условиях для проверки ее достоверности (значение СКО).

Таблица 2. Данные экспериментов по определению равновесной влажности зеленого чая

Относительная влажность, %	Температура, °С	Равновесная влажность, %	СКО, %
11	30	4,03	0,02
32	30	7,75	0,05
43	30	6,9	0,0
51	30	8,65	0,15
75	30	14,65	0,25
11	40	3,58	0,015
32	40	5,72	0,08
43	40	6,19	0,04
51	40	9,28	0,22
75	40	14,68	0,03
11	50	2,82	0,16
32	50	4,71	0,30
43	50	5,35	0,20
51	50	6,86	0,30
75	50	13,40	0,28

Результаты экспериментов (рис. 3, 4, см. табл. 2) показывают значительное влияние как температуры, так и относительной влажности на равновесную влажность.

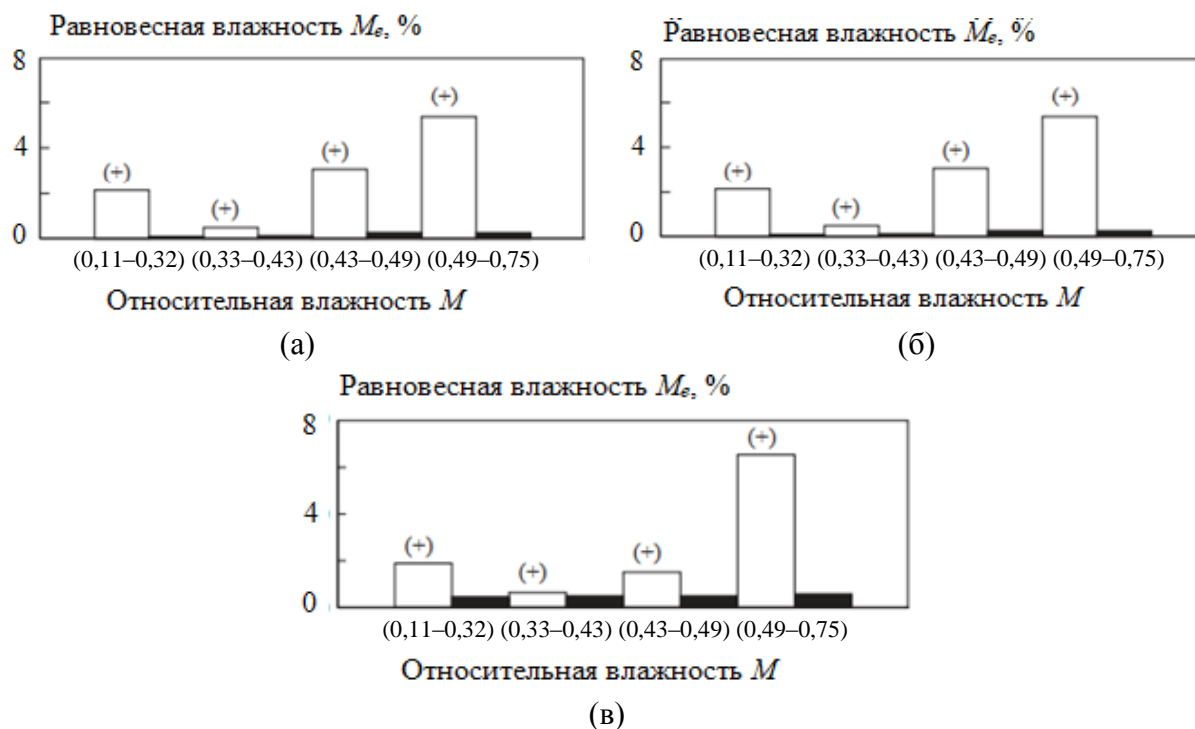


Рис. 3. Положительное влияние относительной влажности на равновесную при различных температурах: $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в); темная полоса – ошибка в расчете эффекта

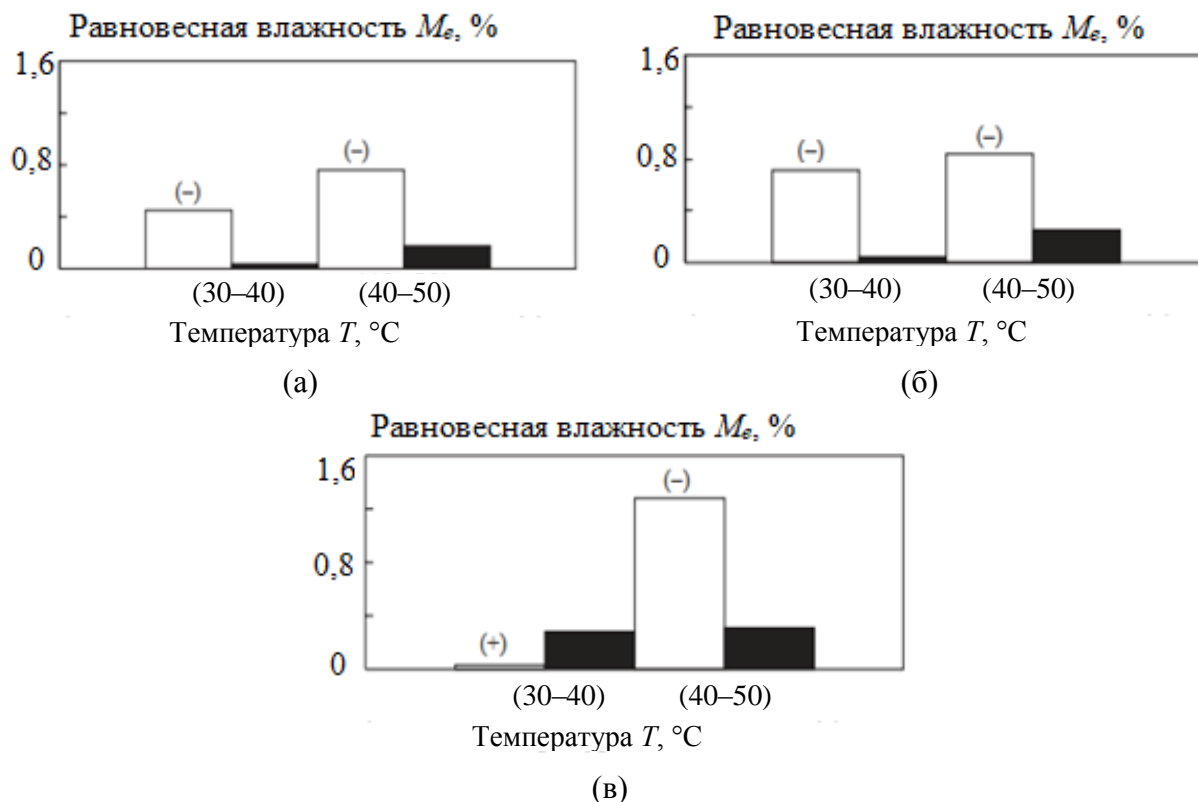


Рис. 4. Влияние температуры на равновесное влагосодержание при различной относительной влажности; (+) – положительное влияние, (-) – отрицательное: $M = 0,11$ (а); $M = 0,43$ (б); $M = 0,75$ (в); темная полоса – ошибка в расчете эффекта

При сравнении данных можно сделать следующие выводы:
во-первых, относительная влажность оказывает большее влияние на равновесную влажность, чем температура;

во-вторых, относительная влажность оказывает положительное влияние на равновесную влажность, т.е. тем большее M , чем большее M_e , а температура – отрицательное влияние.

На рис. 5 представлены графики изотерм равновесной влажности при двух различных температурах, исследованных в этой работе. Экспериментальные результаты подтверждают положительное значимое влияние относительной влажности на значения равновесной влажности, однако из этих результатов следует, что разница между значениями равновесной влажности на рис. 5 слева незначительна, поэтому влияние температуры на M_e требует более детального анализа путем увеличения диапазона температуры. Влияние температуры на результаты равновесной влажности заметно при увеличении разницы температуры исследования более чем на 40 °С. На рис. 5 справа показаны расчетные профили влагосодержания в диапазоне относительной влажности от 0 до 80 % при 10, 50 и 90 °С.

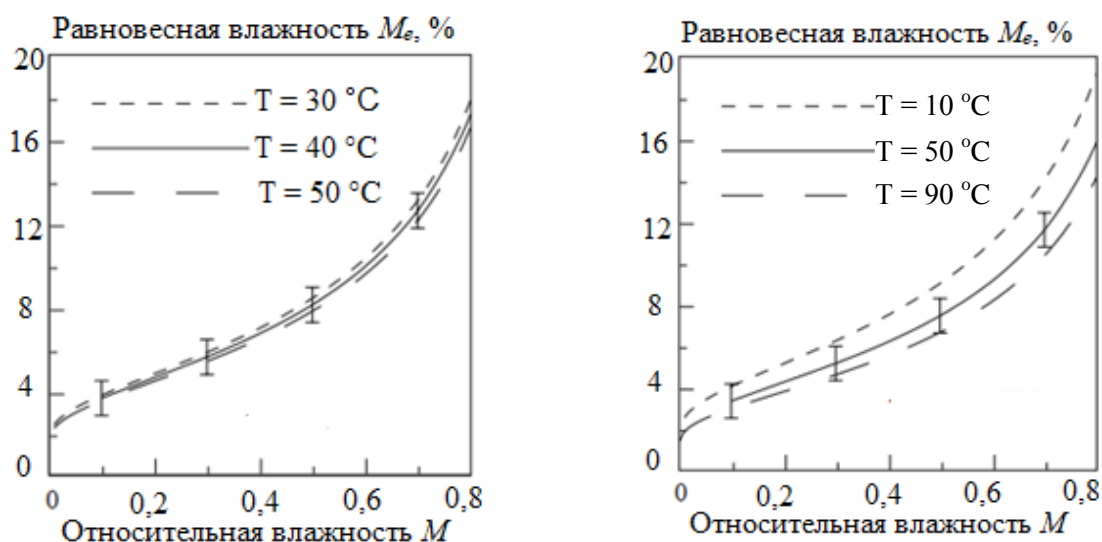


Рис. 5. Графики изотерм равновесной влажности при различных температурах

Для аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая в данной работе использовали нечеткую логику. Чтобы решить эту задачу, необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

Входными переменными являются относительная влажность M и температура T слоя чая (рис. 6). Относительная влажность слоя чая по экспериментальным исследованиям принимает значения от 0 до 80 %. Температура находится в диапазоне 10...90 °С. Выходной величиной является равновесная влажность M_e , которая (по данным экспериментов) принимает значения от 3,58 до 18,6 %.

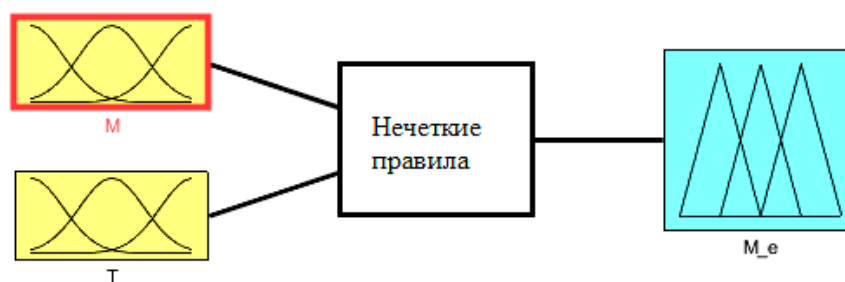


Рис. 6. Входные и выходные переменные блока нечеткой логики

На универсуме нечетких множеств в данном случае будет целесообразно принять пять значений входных и выходных лингвистических переменных. Термножества значений лингвистических переменных изображаются треугольными фигурами, а на границах области определения – сигмоидальными нечеткими интервалами. Для терм-наборов «Мин» и «Макс» переменных приняты трапециевидные формы по причине увеличенного диапазона значений в этой области. Графически лингвистические переменные показаны на рис. 7. Для обозначений термов всех переменных используются следующие слова и их определения: «Минимальная» – Min; «Малая» – M; «Средняя» – Cp; «Большая» – B; «Максимальная» – Max. Таким образом, лингвистические переменные имеют следующие значения: «Температура T » {Min, M, Cp, B, Max}; «Относительная влажность M » {Min, M, Cp, B, Max}; «Равновесная влажность M_e » {Min, M, Cp, B, Max}.

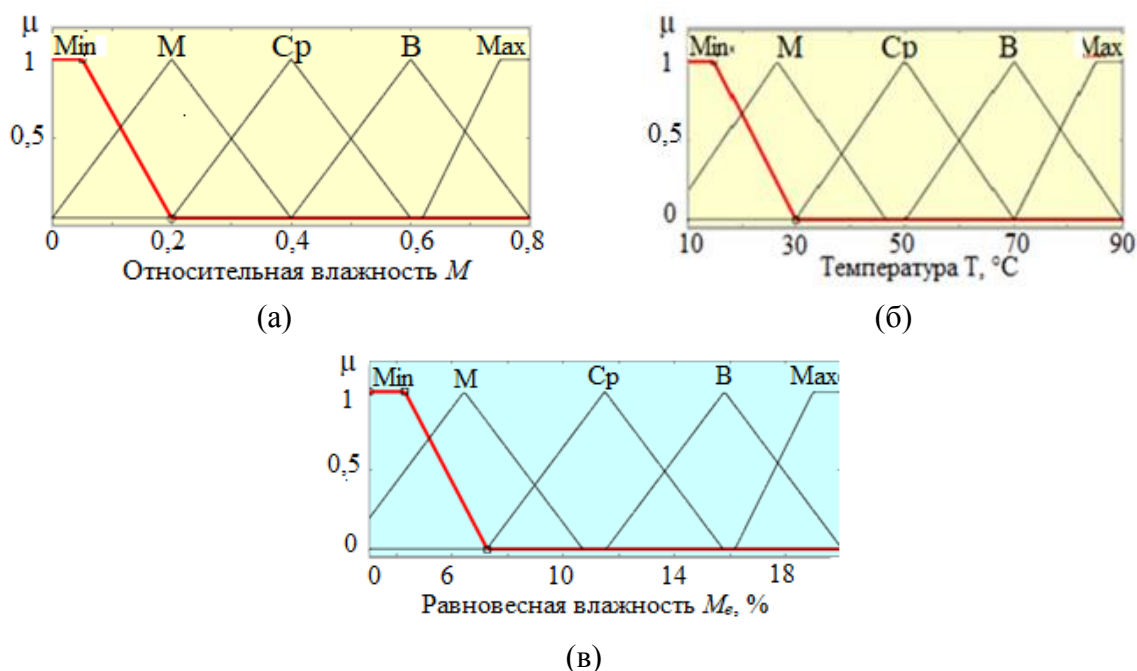


Рис. 7. Функции принадлежности переменных нечеткой логики: относительной влажности (а); температуры (б); равновесной влажности (в)

Для нечеткого вывода функции принадлежности воспользуемся одним из самых распространенных методов – методом Мамдани [6, 7]. В этом случае влияние комбинаций входных воздействий на выходной параметр записывается в следующем виде: если $T = \text{«Мин»}$ и $M = \text{«Мин»}$, то $M_e = \text{«Мин»}$.

С учетом специфики явления формализована база правил нечеткого вывода функции (табл. 3).

Таблица 3. База правил нечеткого вывода функции для равновесной влажности чая

Температура	Относительная влажность				
	Мин	М	Ср	В	Мах
Мин	Мин	Мин	М	В	В
М	Мин	М	М	В	В
Ср	Мин	М	Ср	В	В
В	Мин	М	Ср	В	В
Мах	Мин	М	Ср	В	Мах

Для формирования дефазифицированного значения выходной переменной используется метод преобразования по среднему центру. Четкое значение равновесной влажности рассчитывается по формуле

$$\overline{M_e} = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_k \cdot M_e^k}{\sum_{k=1}^N \mu_k} \quad (11)$$

Аппроксимация зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая реализована в приложении Fuzzy Logic Toolbox среды Matlab (рис. 8) [8].

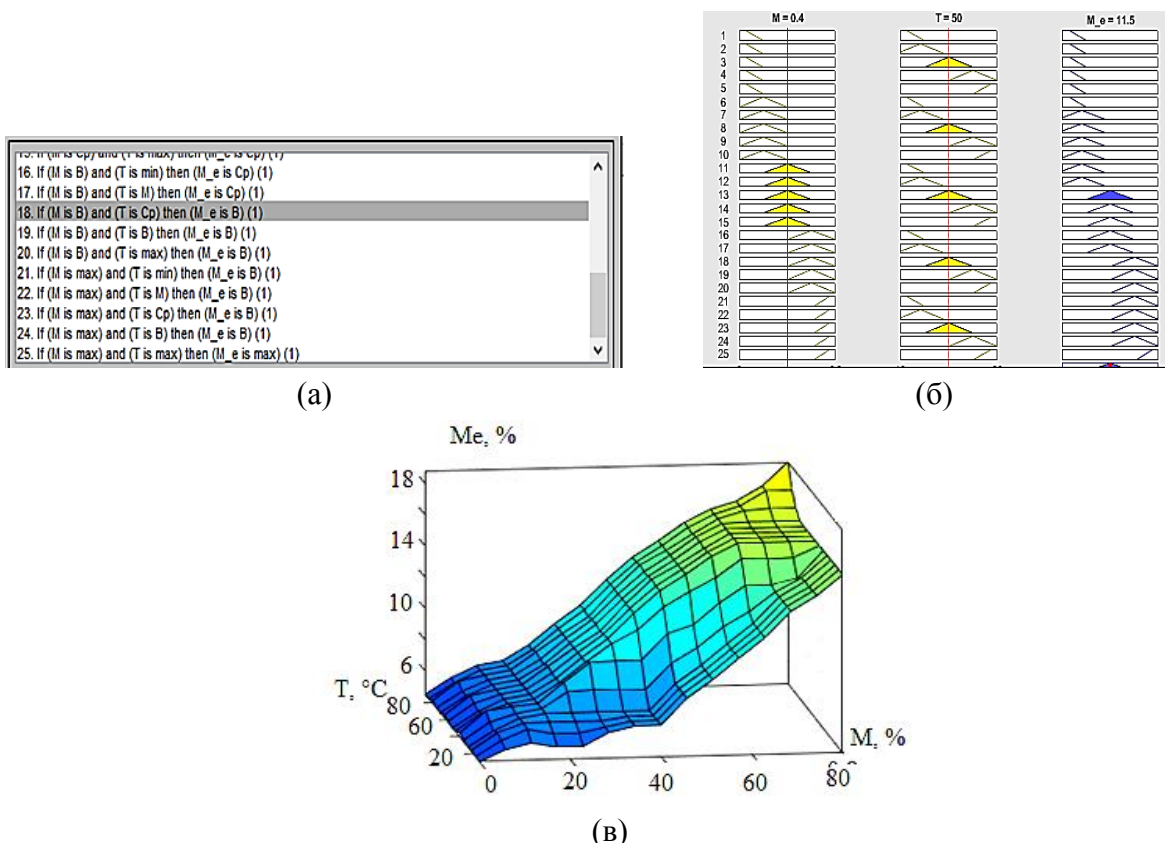


Рис. 8. Нечеткий вывод функций $M_e = f(T, M)$ в приложении Fuzzy Logic Toolbox среды Matlab: база правил нечеткого вывода (а); процедура нечеткого вывода и приведения к четкости (б); функция нечеткого вывода M_e (в)

Подставляя аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя, а также основные параметры процесса термообработки (см. табл. 1) в общую модель сушки зеленого чая, можно провести численный расчет технологического процесса для его моделирования в среде Matlab.

Из приведенного выше решения дифференциальных уравнений в частных производных с помощью МКР и нечеткой аппроксимации зависимости равновесной влажности листьев зеленого чая от относительной влажности и температуры слоя чая можно описывать блок-схему алгоритма программы для вычисления параметров термообработки слоя зеленого чая.

РЕЗУЛЬТАТ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для проверки адекватности полученных математических моделей было проведено экспериментальное исследование процесса сушки зеленого чая в конвейерной сушилке (рис. 9).

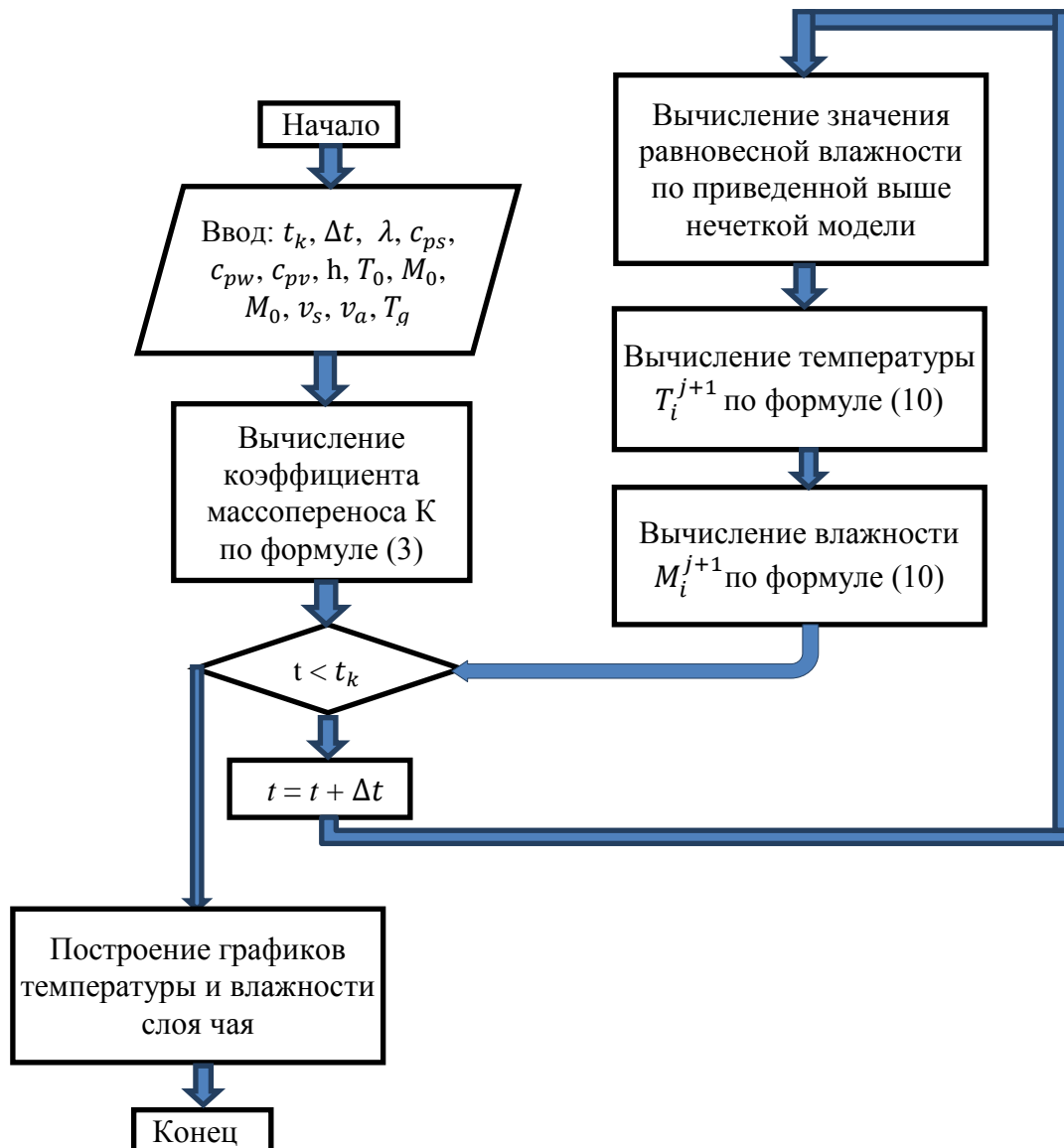


Рис. 9. Алгоритм моделирования процесса сушки зеленого чая

Графики экспериментального исследования процесса сушки использованы для оценки влияния температуры воздуха на влажность и температуру слоя зеленого чая, а также для оценки минимального времени сушки, необходимого для достижения заданных уровней влажности. Для этого были получены кривые зависимости температуры от времени в периодическом режиме (рис. 10) при заданной скорости конвейера $v_c = 0$ м/с. Скорость воздуха, которая была рассчитана на основе площади поперечного сечения конвейерной ленты, была установлена равной 2,0 м/с, а температура воздуха на входе составляла 70, 80 и 100 °С. Температура слоя зеленого чая во время сушки является ключевым фактором для сохранения биоактивных соединений, поэтому необходимо определить эту переменную для создания адекватных условий сушки. Таким образом, температура зеленого чая на небольшом участке конвейерной ленты измерялась с помощью инфракрасного термометра (Uni-trend UT300A, точность $\pm 2\%$) по мере прохождения чая через камеру. Выходную влажность образцов измеряли гравиметрическим методом с использованием цифровых весов (ГЕНАКА, ВГ440; 0–400 г; точность $\pm 10^{-4}$ кг).

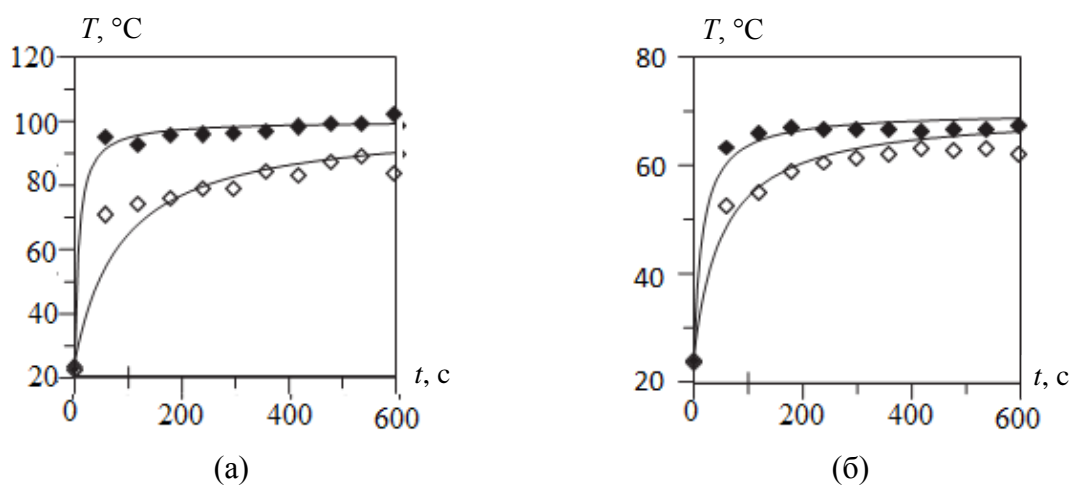


Рис. 10. Результаты сушки при 70 (а) и 100 °С (б).

Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) температуры по модели при начальном значении влажности чая (M_0):
 $M_0 = 1,65$ (черные символы); $M_0 = 1,2$ (белые)

Графики на рис. 10 показывают, что математическая модель (уравнений (1) и (2)) предсказывает достаточно точно значения расчетных и экспериментальных данных температуры поверхности листьев чая во время сушки. При этом погрешность составляет не более 5 %.

Чтобы измерить изменения массы образцов, в процессе сушки на ленту помещали перфорированный лоток. Его можно было легко снять для взвешивания, и это помогло сократить количество допускаемых экспериментальных ошибок. Массу образцов постоянно измеряли с помощью цифровых весов. По массе образцов, измеренной в ходе эксперимента, и исходной массе можно установить количество испарившейся влаги. Результат экспериментов при изучении изменения влажности материала во время сушки показан на рис. 11. На нем представлено относительное отклонение между расчетной (по модели) и экспериментальной влажностями поверхности чайных листьев в диапазоне начального содержания влаги приблизительно 1,2–1,65 кг/кг и температуры воздуха 80–110 °С. В период сушки эта разница не превышает примерно 8 %, особенно на начальных стадиях. Таким образом,

средняя разница между рассчитанными по уравнению (1) значениями влажности поверхности и экспериментальными составляет примерно $5,1 \pm 2,7$ %.

На основе сравнения расчетных кривых и экспериментальных данных сушки зеленого чая в конвейерной сушилке (рис. 10, 11) можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости. Полученные модели рекомендуются для практического применения.

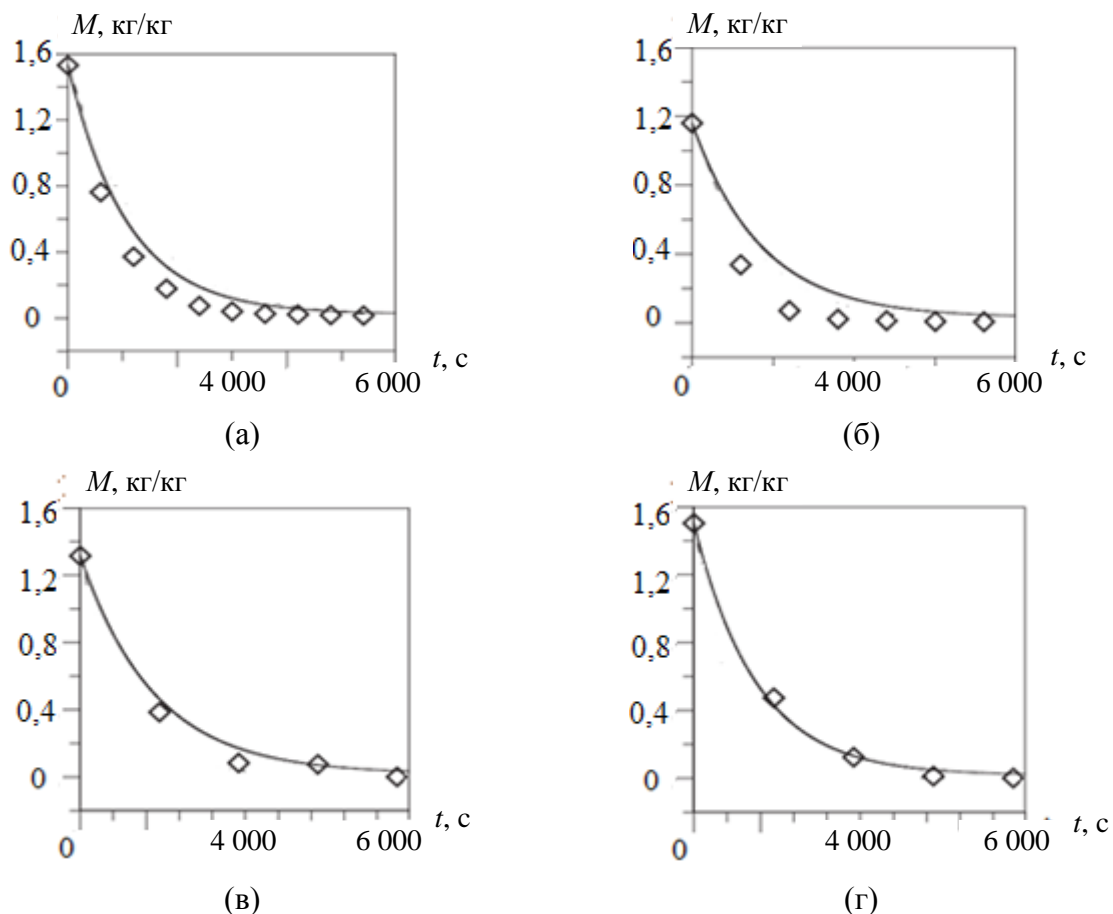


Рис. 11. Экспериментальное (символы) и расчетное (линии) содержание влаги в листьях чая по модели при 70 (а), 80 (б), 100 (в) и 110 °С (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги. В результате исследования:

1. Разработаны математические модели для решения задач распределения влажности и температуры в слоях зеленого чая в процессе сушки.

2. На основе решения дифференциальных уравнений получены функциональные зависимости изменения влажности и температуры зеленого чая (с учетом нечеткой математической модели изменения равновесной влажности зеленого чая).

При имитационном моделировании отмечена хорошая сходимость результатов с экспериментальными данными, что доказывает высокую адекватность разработанной математической модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00914.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cooper R., Morré D.J., Morré D.M. Medicinal benefits of green tea: Part I. Review of noncancer health benefits // *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 2005. V. 11. № 3. P. 521–528.
2. Roshanak S., Rahimmalek M., Goli S.A.H. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. V. 53. P. 721–729.
3. Вавилова О.И. Моделирование сушки черного чая в тонком слое в зависимости от температуры и скорости движения воздуха (Индия. ФРГ) // *Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал*. 2005. № 2. С. 691.
4. Kamke F., Wilson J. Computer simulation of a rotary dryer. Part I: Retention time // *AIChE Journal*. 1986. V. 32. № 2. P. 263–268.
5. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа. 2002. 840 с.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 736 с.
7. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учебное пособие. М.: Физматлит. 2001. 224 с.
8. MATLAB Release Notes for R2008a. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/release-notes.html> (дата обращения: 15.02.2023).

Для цитирования: Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатилов В.Н. Моделирование процесса сушки зеленого чая // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 71–83.

MODELING OF GREEN TEA DRYING PROCESS

K.B. FAM, Postgraduate, P.M. MURASHEV, Postgraduate,
V.N. BOGATIKOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation,
e-mail: phambang79520897405@gmail.com

The paper describes the design and simulation using MatLab and Simulink process of drying green tea in a conveyor belt dryer with fuzzy approximation of the dependence of the equilibrium moisture content of tea on its relative humidity and temperature. On the basis of comparison of calculated curves for the developed model, as well as on the basis of available experimental data on drying of green tea in a conveyor dryer the conclusion about their satisfactory convergence was made. The obtained models are recommended for practical application.

Keywords: green tea drying, fuzzy set theory, drying mathematical model, equilibrium moisture, green tea moisture.

Поступила в редакцию/received: 03.03.2023; после рецензирования/ revised: 24.03.2023;
принята/accepted: 03.04.2023

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА ГАЗОВ

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

© Илясов Л.В., 2023

Приведены результаты экспериментальных исследований инфракрасного полупроводникового детектора газов, созданного на базе серийно выпускаемого полупроводникового преобразователя типа ПП-1, принцип действия которого основан на измерении электропроводности нагретого до температуры 400...450 °С полупроводникового чувствительного элемента при его контакте с горючими газами. Установлено, что изменение электропроводности данного элемента сопровождается инфракрасным излучением, что позволяет использовать для получения измерительной информации о концентрации анализируемого газа измерение интенсивности излучения инфракрасным фотодиодом. Описаны конструкции детектора и лабораторной установки для его исследований. Приведены зависимости сигнала детектора от его основных режимных параметров: концентрации анализируемых газов (водород, пропан) в потоке газа-носителя (воздуха); напряжения питания полупроводникового чувствительного элемента; расстояния между чувствительным элементом и инфракрасным фотодиодом; расхода газа-носителя. С использованием стандартной методики найдены значения основных метрологических характеристик детектора.

Ключевые слова: инфракрасный полупроводниковый детектор, газ, эксперимент, концентрация, излучение, метрология.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-84-89

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий постоянно требует совершенствования известных и разработки новых средств контроля газовых сред. Среди разрабатываемых в настоящее время важное место занимают полупроводниковые детекторы и датчики, работы по созданию которых были начаты еще во второй половине XX века [1–7]. Сейчас полупроводниковые детекторы и датчики широко применяются в промышленности, на транспорте, в системах контроля окружающей среды, а последнее время – в устройствах типа «электронный нос» [6, 7]. Они обладают компактностью, высокой чувствительностью, простотой конструкции и низкой стоимостью. В нашей стране широко применяются полупроводниковые преобразователи концентрации газов типа ПП-1 и ДМП-1, которые обеспечивают контроль концентраций таких газов, как метан и пропан, на уровне 10 ppm. Информация, приводимая в паспортах на эти устройства, свидетельствует о том, что их сигналы формируются за счет изменения электропроводности полупроводниковых чувствительных элементов при адсорбции на их поверхности названных газов. Предварительные исследования данных устройств, выполненные на кафедре «Автоматизация технологических процессов» Тверского государственного технического университета (ТвГТУ), позволили установить [8, 9], что сигнал устройств не только формируется за счет изменения электропроводности, но и зависит от каталитического сгорания горючих газов, которое сопровождается

появлением интенсивного инфракрасного излучения. Такое явление определяет возможность использования дополнительного канала возникновения инфракрасного излучения для получения измерительной информации, что, в свою очередь, определяет целесообразность проведения исследований работы полупроводниковых детекторов газов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время полупроводниковые детекторы и датчики выпускаются многими зарубежными и отечественными фирмами. Сигнал данных устройств формируется за счет изменения электропроводности чувствительного элемента при адсорбции на нем молекул детектируемого вещества. На кафедре «Автоматизация технологических процессов» ТвГТУ при исследовании одного из типов полупроводниковых преобразователей, а именно преобразователей типа ПП-1, было установлено, что взаимодействие горючих газов с чувствительными элементами преобразователя сопровождается возникновением инфракрасного излучения. Таким образом, имеется еще один канал получения измерительной информации при эксплуатации полупроводниковых преобразователей концентрации газов. На основе этого был создан и запатентован [9] инфракрасный полупроводниковый детектор газов (ИКППД). Для его экспериментальных исследований была сконструирована лабораторная установка (рис. 1).

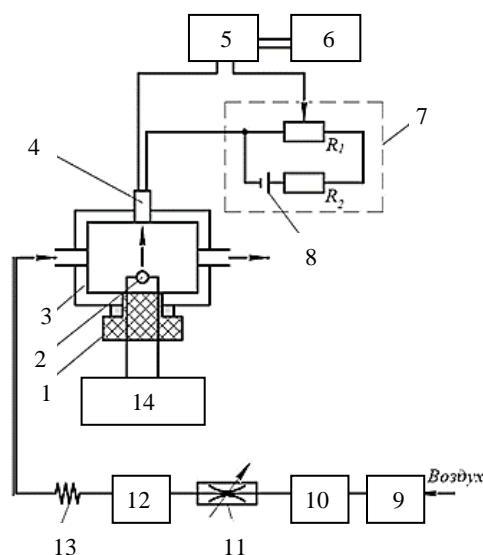


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований ИКППД:

- 1 – полупроводниковый преобразователь концентрации газов;
- 2 – полупроводниковый чувствительный элемент преобразователя;
- 3 – проточная камера; 4 – инфракрасный фотодиод;
- 5 – электрометрический усилитель типа ИМТ-05;
- 6 – электронный потенциометр типа КСП-4;
- 7 – блок коррекции начального уровня сигнала детектора; 8 – батарейка;
- 9 – стабилизатор давления газа-носителя;
- 10 – осушитель газа-носителя; 11 – переменный дроссель;
- 12 – устройство ввода проб газов;
- 13 – колонка (пластмассовая трубка с внутренним диаметром 3 мм и длиной 1,5 м);
- 14 – стабилизированный источник электропитания типа Б5-47;
- R_1 – переменный резистор (1,6 кОм); R_2 – постоянный резистор (6,8 кОм)

Все исследования проводились с использованием полупроводникового преобразователя типа ПП-1 и инфракрасного фотодиода типа ФД-265А. Для упрощения и ускорения работ применялся импульсный метод ввода проб анализируемых газов [10] в поток газа-носителя, позволяющий минимизировать расход чистых анализируемых газов.

Исследования выполнялись следующим образом. С помощью стабилизированного источника электропитания устанавливалось напряжение, которое подавалось к чувствительному элементу детектора. В соответствии с паспортом ПП-1 максимальное значение этого напряжения не превышало 1,3 В. С помощью переменного дросселя устанавливался расход газа-носителя (воздуха) в детектор на значениях 1...3 л/ч. Пробы анализируемых газов объемом 0,1...1,0 мкл при использовании специального шприца вносились в поток газа-носителя через устройство ввода. Пробы транспортировались потоком газа-носителя в ИКППД. Перед вводом осуществлялась корректировка начального уровня сигнала детектора. Использование колонки в составе установки определяется необходимостью исключения ситуации, при которой может произойти наложение изменений начального уровня сигнала детектора, возникающих в момент ввода пробы газа, на полезный импульсный сигнал.

При поступлении пробы анализируемого газа в детектор происходит ее частичное каталитическое сгорание, так как температура чувствительного элемента составляет 400...450 °С. При этом возникает инфракрасное излучение, которое улавливается инфракрасным диодом. Сигнал данного фотодиода поступает на электрометрический усилитель, выходной сигнал которого измеряется и регистрируется электронным потенциометром. Этот сигнал имеет форму импульса, а его параметры (амплитуда h , мм, или площадь S , мм²) используются для получения измерительной информации о концентрации анализируемого вещества в потоке газа-носителя.

Определение зависимости сигнала ИКППД от объема проб анализируемых газов осуществлялось при следующих условиях: расход газа-носителя 2 л/ч; расстояние между чувствительным элементом и окном фотодиода 3 мм; объем проб анализируемых газов 0,2; 0,5; 0,8 и 1,0 мкл. Перед вводом проб объемом 0,2; 0,5 и 0,8 мкл они разбавлялись воздухом до объема 1,0 мкл. Температура детектора составляла 20 °С (при этой температуре выполнялись все описанные ниже исследования). В опытах использовались водород и пропан.

На рис. 2 показаны зависимости амплитуды h и площади S сигнала детектора от объема проб V_d анализируемых газов. На графиках, приведенных на рис. 2, как и на всех последующих, значение для каждой точки определялось по результатам трех измерений и последующего усреднения. Полученные зависимости являются практически линейными.

Для оценки влияния напряжения питания на сигнал ИКППД были выполнены измерения этого сигнала при различных значениях напряжения питания, которые задавались с помощью стабилизированного источника электропитания. На рис. 3а показана зависимость амплитуды сигнала ИКППД от напряжения питания U чувствительного элемента. Было также установлено, что при напряжении питания меньше 1,1 В детектор теряет работоспособность.

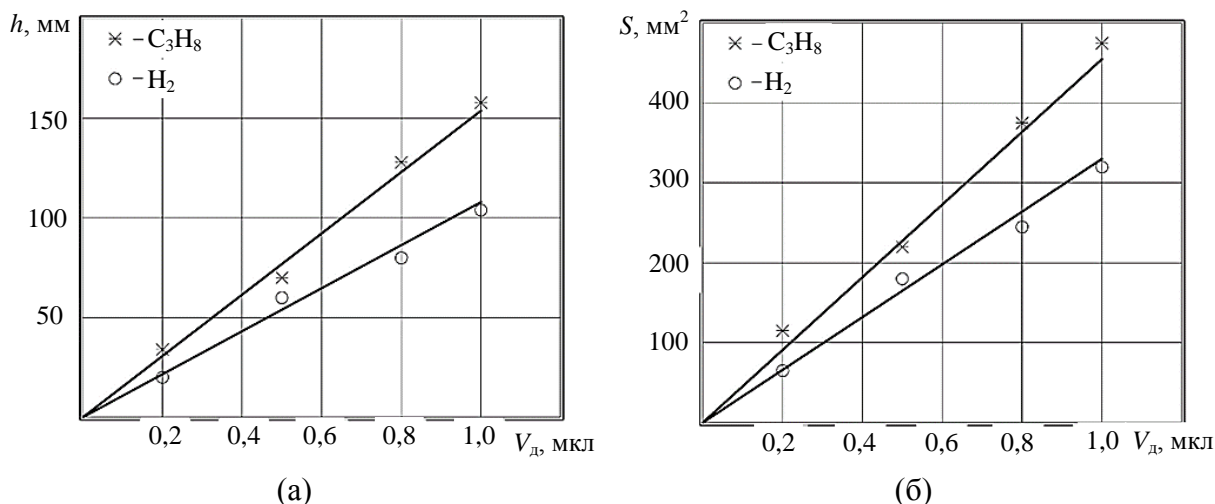


Рис. 2. Зависимость амплитуды (а) и площади (б) сигнала детектора от объема проб анализируемого газа

Поскольку сигнал ИКППД формируется за счет инфракрасного излучения, представлялось естественным определение зависимости его сигнала от расстояния δ между чувствительным элементом и окном инфракрасного фотодиода. Эти исследования проводились при следующих условиях: расход газа-носителя 2 л/ч; напряжение питания 1,3 В; объем пробы анализируемого газа (водород) 1 мкл; расстояние 3...13 мм; минимальное значение расстояния определялось конструктивными возможностями преобразователя ПП-1. Результаты измерений приведены на рис. 3б. Видно, что амплитуда сигнала ИКППД несущественно уменьшается с увеличением расстояния.

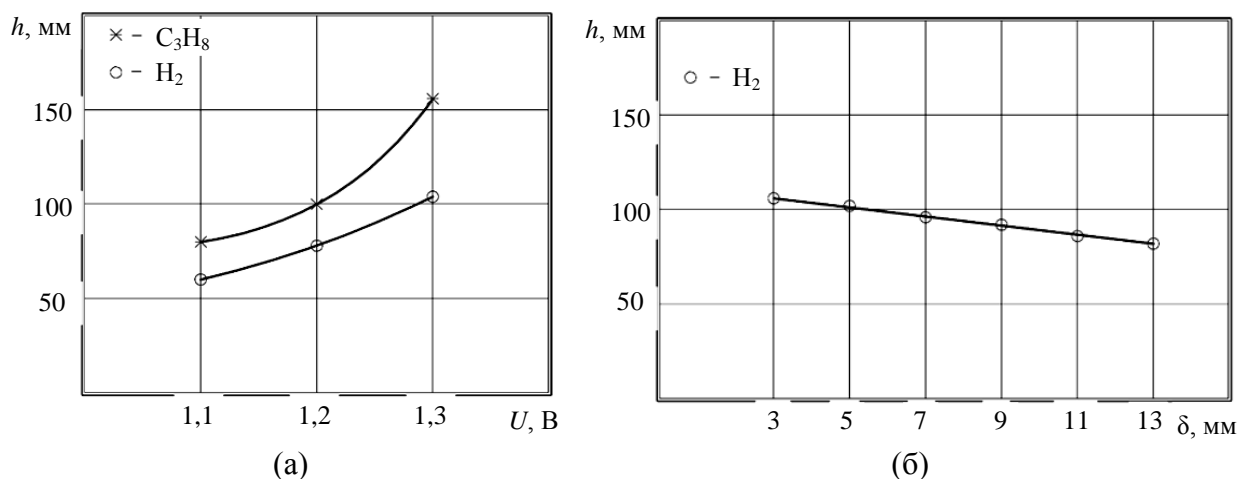


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала детектора от напряжения питания полупроводникового чувствительного элемента (а); расстояния между чувствительным элементом и окном инфракрасного фотодиода (б)

С учетом того, что ИКППД может быть использован в составе газоанализаторов и газосигнализаторов различных горючих газов и паров при различных расходах газоздушных смесей, а также в составе газовых хроматографов, в которых расход газа-носителя определяется условиями разделения компонентов, необходимо определение зависимости сигнала ИКППД от объемного расхода газа-носителя.

Установление этой зависимости осуществлялось при следующих условиях: объем проб анализируемых газов 1 мкл; напряжение питания 1,3 В; расход газа-носителя 1, 2 и 3 л/ч. На рис. 4 приведены зависимости амплитуды h и площади S сигнала детектора от расхода газа-носителя. Как видно, амплитуда и площадь сигнала детектора, вызванные прохождением через него пробы анализируемого газа, с увеличением расхода газа-носителя уменьшаются, что определяется сокращением концентрации анализируемых газов в потоке газа-носителя.

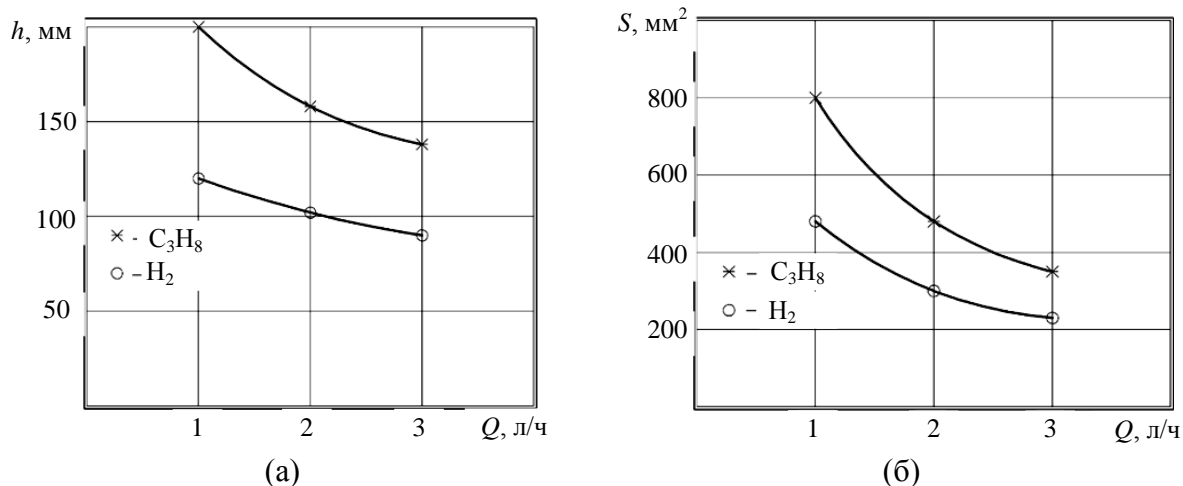


Рис. 4. Зависимость амплитуды (а) и площади (б) сигнала детектора от расхода газа-носителя

Специальными исследованиями, результаты которых не вошли в данную статью, было установлено, что ИКППД обладает чувствительностью к парам жидких углеводородов различных классов.

С использованием стандартной методики были найдены значения основных метрологических характеристик детектора: порога чувствительности – $4 \cdot 10^{-6}$ % об.; максимальной концентрации в пределах линейности статической характеристики – 0,1 % об.; уровня шума – $0,4 \cdot 10^{-12}$ А; постоянной времени – 0,3...1,0 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что описанный в статье детектор газов является новым техническим средством получения измерительной информации о микроконцентрации горючих газов в воздухе. Его разработка и исследование подтвердили возможность использования дополнительного канала получения измерительной информации, основанного на измерении инфракрасного излучения, возникающего при каталитическом сгорании горючих газов на полупроводниковом чувствительном элементе. Для выявления всех информационных возможностей ИКППД необходимы разработка математической модели сигнала детектора; проведение исследования зависимости его сигнала от температуры; изучение возможности использования в составе детектора более чувствительных приемников инфракрасного излучения; исследования работы детектора на газе-носителе гелии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасевич В.Н. Металлические терморезисторные преобразователи горючих газов. Киев: Наукова думка. 1988. 284 с.

2. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат. 1963. 96 с.
3. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. М.: Техносфера. 2005. 592 с.
4. Оводок Е.Л., Ивановская М.И., Котиков Д.А. Оценка влияния Au (III) на газочувствительные свойства сенсоров на основе оксида индия // *Вестник БГУ. Сер. 2: Химия, биология, география*. 2009. № 3. С. 3–6.
5. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях / И.А. Мясников [и др.]. М.: Наука. 1991. 327 с.
6. Долгополов Н.В., Яблоков М.Ю. Электронный нос – новое направление индустрии безопасности // *Мир и безопасность*. 2007. № 3. С. 54–59.
7. Оценка возможности применения металлооксидных сенсоров в устройствах «Электронный нос» / В.П. Кулагин [и др.] // *Датчики и системы*. 2016. № 11. С. 39–48.
8. Илясов Л.В. Исследование полупроводникового керамического преобразователя концентрации газов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 44–49.
9. Патент РФ 213294 *Полупроводниковый преобразователь концентрации газов* / Илясов Л.В., Иванова Н.И.; Заявл. 08.06.2022. Опубл. 05.09.2022. Бюл. № 2.
10. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических газоанализаторах // *Измерительная техника*. 1971. № 4. С. 34–38.

Для цитирования: Илясов Л.В. Исследования инфракрасного полупроводникового детектора газов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 84–89.

INFRARED SEMICONDUCTOR GAS DETECTOR RESEARCH

L.V. ILYASOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: lvi450714@mail.ru

The results of experimental studies of an infrared semiconductor gas detector, created on the basis of a commercially available semiconductor converter of the PP-1 type, whose principle of operation is based on measuring the electrical conductivity of a semiconductor sensing element heated to a temperature of 400...450 °C when it comes into contact with flammable gases, are presented. It has been established that the change in the electrical conductivity of this element is accompanied by infrared radiation, which makes it possible to use the measurement of the intensity of this radiation by an infrared photodiode to obtain measuring information about the concentration of the analyzed gas. The designs of the detector and the laboratory installation for its research are described. The dependences of the detector signal on its main operating parameters are given, namely: on the concentration of the analyzed gases (hydrogen, propane) in the carrier gas (air) flow, on the supply voltage of the semiconductor sensing element, on the distance between the sensitive.

Keywords: infrared, semiconductor, detector, gas, experiment, concentration, radiation, metrology.

Поступила в редакцию/received: 04.03.2023; после рецензирования/ revised: 24.03.2023;
принята/accepted: 03.04.2023

АБСТРАКТНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И НАБОРОВ ИДЕЙ

Д.И. ПРИХОДЬКО¹, магистр, А.В. МОКРЯКОВ^{2,3}, канд. физ.-мат. наук,
В.В. ГОРШКОВ³, д-р техн. наук

¹ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1, e-mail: mitry1205@mail.ru

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, Москва, Волоколамское ш., 4, e-mail: ali.latex@gmail.com

³Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)

119071, Москва, ул. Малая Калужская, 1, e-mail: gorshkov-vv@rguk.ru

© Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В., 2023

В статье рассмотрен вопрос взаимосвязи существующих методов моделирования информационных систем, описаны достоинства концептуального, математического, натурального моделирования. Показано, что первородным вариантом выступает идейное моделирование, под которым подразумевается абстрактное смысловое предположение. Продемонстрировано отличие идеи от концепции. Построено несколько вариантов взаимодействия: линейное, линейно-переменное, блок-схема детального варианта. Для последнего указано, что функция перехода может быть реализована на основе необходимого математического или логического аппарата. Обозначено, что простейший вариант модели представляет собой пересечение между множествами каждого типа моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование, концептуальное моделирование, натурное моделирование, идейное моделирование, взаимосвязь методов моделирования.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-90-95

ВВЕДЕНИЕ

Во все времена ученые и изобретатели разрабатывали различные системы, к которым, кроме всего прочего, относятся системы медицинские и технические, в том числе и вычислительные. При выполнении разработки основной вопрос, стоящий перед исследователями, заключается в том, какой из существующих способов моделирования необходимо выбрать и для каких задач и при каких условиях применение такого способа является оптимальным.

Зачастую разработки современных технических систем не ограничиваются применением только одного типа моделирования. Обычно используются несколько, т.е. создается концепция, затем строится логическая модель, а затем проектируется натурная модель технической системы. В связи с этим возникает принципиальный вопрос о том, как могут быть связаны между собой эти способы моделирования. Иными словами, есть ли возможность в абстрактном виде определить взаимосвязи между указанными типами моделирования? Можно задать еще один вопрос: существует ли возможность объединить данные типы моделирования с идеей?

Указанные вопросы встают особенно остро, когда рассматривается задача создания вычислительных систем, которые должны работать в экстремальных условиях. Примером являются атомные реакторы или оборудование, используемое в космическом пространстве (на орбите Земли или любой другой планеты). В этих случаях проектирование механизмов требует особого подхода [1, 2].

МЕТОДОЛОГИЯ

На текущий момент известны такие виды моделирования, как модель концепции; математическая; предварительная (натурная). Авторами предложено для построения связки добавить первым пунктом идею. Таким образом, классификация моделирования примет следующий вид: идея; модель концепции; математическая; предварительная (натурная).

Важно отметить, что в рамках данной классификации идея поставлена отдельным пунктом по следующей причине: концептуальная модель представляет собой стандартизированную идею с точки зрения просмотренных как технических цепочек исполнителя, так и покупательной способности заказчика (с согласованием специальной проектной документации). Идея представляет собой предположение, имеющее потенциал для реализации, тогда же как концепция – это сформированное предложение, которое принято для реализации. По этой причине идей всегда больше, чем концепций. При этом связь идеи с концепцией, математической и натурной моделью не всегда является линейной. Более того, концепция в некоторых случаях включает в себя не одну, а несколько (но структурированных) идей. Таким образом, модель концепции – это набор согласованных и проработанных идей с точки зрения документации. Иное определение было дано в диссертации [3]: «Мы будем под концептуальной моделью понимать общую концепцию ИС (информационной системы). Именно концептуальная модель несет в себе идейную нагрузку построения ИС». Тем не менее концепция решения еще не означает, что были разобраны все технические вопросы. Множество вопросов и предложений возникает на этапе создания математической модели.

При выполнении математического моделирования [4] происходит максимально полное соответствие по выбранному набору критериев модели и объекта. Математическое моделирование позволяет связать начальные и конечные состояния вычислительной системы между собой через определенные алгоритмы (табл. 1). Важно отметить, что к математическому моделированию относят еще и компьютерное.

Таблица 1. Достоинства и недостатки моделирования математическим аппаратом

Достоинства	Недостатки
1. Хорошая точность решения. Математическая модель может быть построена с любой точностью по требуемым характеристикам изделия	1. Соотнесение с реальностью. Далеко не всегда получается правильно построить модель. Слишком много факторов влияет на технические изделия
2. Дешевизна. Стоимость построения математической модели включает только набор ПО и специалиста, который строит модель. Построение реального макета будет дороже	2. Проблема с точностью. В некоторых случаях математическая модель дает не точное решение, а лишь аналитическое

Таким образом, математическое моделирование является первым приближением объекта к показателям задания от заказчика.

Предварительное (натурное) моделирование подразумевает создание технического решения [5] в пропорциональном или реальном размере для проведения испытаний (табл. 2).

Таблица 2. Достоинства и недостатки натурного моделирования

Достоинства	Недостатки
1. Практически абсолютная точность. Достигается за счет того, что тестовое изделие помещается в максимально приближенные условия	1. Высокая стоимость. Организация подобных условий во многих случаях является более дорогостоящей, чем математическое моделирование
2. Легкость доработки изделия. За счет приближения внешних условий легко выявляются ошибки	2. Периоды между испытаниями сильно растянуты. Это связано с тем, что доработки не всегда можно выполнить в короткий срок

Таким образом, натурное моделирование самое точное, но при этом и самое дорогостоящее.

Целью статьи является построение простейшей модели, которая связывает между собой идею, концепцию, математику и итоговое решение. Чтобы достичь цели, воспользуемся индуктивным методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже было сказано ранее, можно связать идею с тремя типами моделирования. В простейшем случае связь может быть организована линейным образом, однако это будет не совсем корректно. Правильнее будет осуществить задуманное при линейном прогрессе, являющемся простейшим вариантом связи (рис. 1).

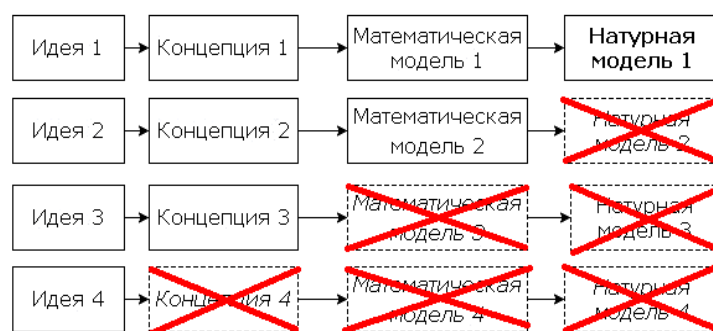


Рис. 1. Модель переключения между типами моделирования информационной системы

На рис. 1 изображен простейший случай: выбрана реализация только первой идеи. В процессе построения концепции, математической модели и натурной принято решение оставить только натурную модель 1, которая была получена из первой идеи. Естественно, в реальной жизни подобное случается крайне редко, так как обычно выбирается несколько натуральных моделей. Если предположить, что в компании в процессе разработки внедряется каждая вторая идея, то такое внедрение можно отобразить при помощи детализированной модели (рис. 2).



Рис. 2. Расширенный вариант структуры взаимодействия идеи и натурной модели, которая является тестовым макетом системы

Внедряли (см. рис. 2) не просто две натурные модели. При внедрении модель 3 была переосмыслена, так как математическая модель оказалась непригодной в отличие от натурной. При этом в общем виде взаимодействие трех моделей можно описать более детально. С точки зрения взаимодействия моделей идеи в некоторых случаях отбрасываются и возвращаются. Это касается и концепций, и математических моделей, и натуральных. С учетом возможностей возврата, исправления и доработки структуры взаимосвязи, изображенные на рис. 1 и 2, преобразуются в детализированную структуру (рис. 3).

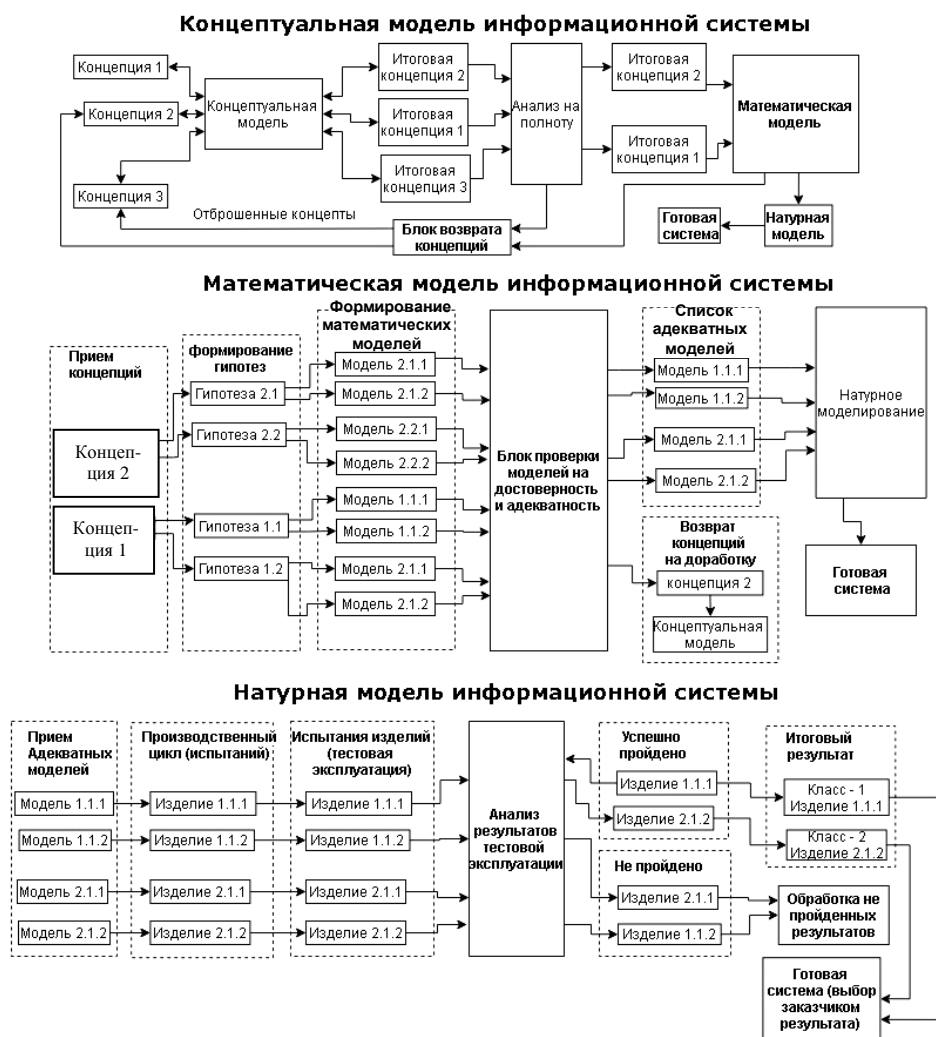


Рис. 3. Детализированная структура взаимодействия типов моделирования

С точки зрения математики модель взаимодействия можно записать в очень упрощенном варианте – как набор взаимодействующих множеств:

$$\text{Изделия} = (\text{Идеи} \cap \text{Концепции}) \cap \text{Математика} \cap \text{Натурные}_\text{ модели}.$$

Из приведенной формулы видно, что число возникающих идей всегда больше числа тех, которые получают практическое воплощение. Концепций технического решения тоже зачастую больше, так как часть концепций приходится отвергать по различным причинам (как правило, экономическим). Математические и натурные модели практически всегда совпадают за очень редким исключением. Тем не менее математических моделей обычно больше, так как на практике их создание обходится дешевле. Натурных моделей тоже меньше, чем серийных производств, это вызвано тем, что у технического изделия в ходе проектирования появляются многочисленные требования и доработки. Из-за этого реализуются далеко не все модели.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основное отличие рассмотренной в статье модели заключается в том, что она предполагает непосредственное связывание идеи, концептуальной, математической и натурной моделей в единую и понятную структуру. При этом пересечение множеств отображает ситуации, когда часть концепции оказывается нежизнеспособной или же в процессе разработки выяснилось, что изначальная идея оказалась неверной, но тем не менее она дала правильный результат с точки зрения компании и рынка в целом.

Построенная в статье структура взаимодействия нескольких типов моделирования в упрощенном варианте подразумевает, что идеи и концепции были воплощены сразу. При этом приведенная расширенная структура показывает, что идеи часто имеют свойство изменяться. Более того, абстрактное построение дает первичное представление о взаимосвязях типов моделирования, что на практике позволит улучшить методологию и стандартизацию при разработке современных информационных и вычислительных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная абстрактная модель дает наглядное базовое представление о том, как идеи получают реальные технические воплощения. Дан ответ, каким образом концепция, математика и натурная модель могут быть взаимосвязаны. Было продемонстрировано различие между идеей и концепцией и показано, насколько данное различие является существенным.

Таким образом, полученная модель позволяет с некоторой точностью определить возможную функцию перехода (в простейшем случае используются стандартные операции над множествами) между идеями и концепциями. Подобные функции, как правило, предопределены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько Д.И., Мокряков А.В. Модель унификации первичного мультизагрузчика ОС на BIOS, UEFI и security boot // *Инновационное развитие техники и технологий в промышленности: Сборник материалов Всеросс. научн. конф.* М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2020. С. 125–127.

2. Мокряков А.В., Приходько Д.И. Общие концепции и идеи теории эксплуатации в контексте вычислительной техники // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки».* 2020. № 12. С. 88–92.

3. Горшков А.В. Разработка и обоснование крупных информационных систем с учетом динамики их жизненного цикла. Дисс... канд. техн. наук. Москва. 2011. 206 с.
4. Информационные технологии и вычислительные системы: Высокопроизводительные вычислительные системы. Математическое моделирование. Методы обработки информации / под ред. С.В. Емельянова. М.: Ленанд. 2012. 100 с.
5. Белов В.В. Проектирование информационных систем. М.: Академия. 2018. 144 с.

Для цитирования: Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В. Абстрактная модель взаимосвязи существующих методов моделирования информационных систем и наборов идей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 90–95.

ABSTRACT MODEL OF THE RELATIONSHIP BETWEEN EXISTING INFORMATION SYSTEM MODELING METHODS AND A SET OF IDEAS

D.I. PRIKHODKO¹, Master, A.V. MOKRYAKOV^{2,3}, Cand. Sc.,
V.V. GORSHKOV³, Dr. Sc.

¹FSC Research Institute for System Research RAS
bld. 1, 36, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russian Federation,
e-mail: mitry1205@mail.ru

²Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe Hwy., Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: ali.latex@gmail.com

³Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)
1, st. Malaya Kaluzhskaya, Moscow, 119071, Russian Federation,
e-mail: gorshkov-vv@rguk.ru

The question of the interconnection of existing methods of modeling information systems is considered. Advantages of conceptual, mathematical, natural modeling are considered and described. It was shown that the original version of everything is ideological modeling, by which the authors mean an abstract semantic assumption. The difference between the idea and the concept was demonstrated. Several interaction options were built: linear, linear-variable, block diagram of a detailed option. At the same time, it was indicated for the latter that the transition function can be implemented on the basis of the necessary mathematical or logical apparatus. It has been shown that the simplest version of the model is the intersection between sets of each type of modeling.

Keywords: mathematical modeling, conceptual modeling, natural modeling, ideological modeling, the relationship of modeling methods.

Поступила в редакцию/received: 10.01.2023; после рецензирования/revised: 31.01.2023;
принята/accepted: 06.02.2023

ОБЗОР СТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Д.И. ПРИХОДЬКО¹, магистр, А.В. МОКРЯКОВ^{2,3}, канд. физ.-мат. наук,
В.В. ГОРШКОВ³, д-р техн. наук

¹ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1, e-mail: mitry1205@mail.ru

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, Москва, Волоколамское ш., 4, e-mail: ali.latex@gmail.com

³Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)

119071, Москва, ул. Малая Калужская, 1, e-mail: gorshkov-vv@rguk.ru

© Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В., 2023

В статье рассмотрено современное представление вычислительных систем в системном анализе. Авторами проведены дополнительная внутренняя систематизация и классификация защитных механизмов вычислительной системы, предназначенной для эксплуатации в космических условиях. На основе приведенной классификации защитных механизмов была построена расширенная структура вычислительной системы.

Ключевые слова: структура вычислительной системы, экстремальные условия окружающей среды.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-96-103

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существующий системный подход позволил достигнуть высот в различных отраслях науки и техники. Современные вычислительные системы прошли путь от научно-исследовательских инструментов до современной портативной техники. При этом повышалось качество ее обслуживания и мощность использования. В результате эволюционировало и понятие системного подхода и анализа как категории работы различных систем, что привело к значительному усовершенствованию теории систем, которая позволила многим отраслям развиваться в рамках концепции системного подхода. В процессе возрастания мощности вычислительных систем стал существенно расширяться перечень задач, решаемых данными системами, и в настоящее время вычислительные системы используются в том числе и для выполнения космических исследований (как автономно на различных зондах, так и на орбитальных станциях, например МКС).

Тем не менее эксплуатация вычислительных систем в космических условиях подразумевает применение специфических механизмов и методов для обеспечения работоспособности. Целью статьи является построение расширенной структуры вычислительной системы, эксплуатирующейся в космических условиях.

МЕТОДОЛОГИЯ

Вычислительные системы, которые созданы для решения задач в экстремальных условиях окружающей среды, имеют внутренние особенности [1]. Например, микропроцессоры (МПС), устанавливаемые в них, предполагают наличие специальных

дополнительных механизмов. В частности, для вычислительных систем, эксплуатируемых в космических условиях, используют специализированные защитные механизмы, суть которых заключается в том, чтобы предотвратить воздействие агрессивной окружающей среды на функциональную часть системы.

Простейшая структура взаимодействия систем с окружающей средой показана на рис. 1.

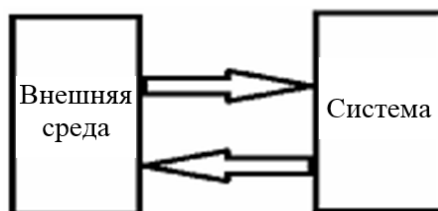


Рис. 1. Общая структура взаимодействия системы с внешней средой

Приведенная структура (см. рис. 1) является универсальной. Тем не менее основная проблема эксплуатации вычислительных систем состоит в том, что существует довольно обширный перечень задач, в которых необходимо разделять внутреннее устройство системы на составляющие, т.е. на механизмы, обеспечивающие защиту вычислительной системы от воздействия внешней среды, и механизмы, осуществляющие полезную работу. Например, корпус ноутбука защищает материнскую плату от попадания пыли и влаги, а материнская плата обеспечивает взаимодействие МПС с оперативной памятью, монитором и т.д.

Таким образом, защитные механизмы являются самыми уязвимыми компонентами вычислительных систем, поскольку корректируют рабочие условия для функционала и обеспечивают защиту от внешних изменений. Структуру взаимодействия вычислительной системы можно представить в виде набора компонентов [2, 3]:

1. Внешние условия – это среда, в которой функционирует система. Условия бывают стабильными и нестабильными.

2. Система. Делится на следующие составляющие:
адаптивные механизмы и защитные – компенсируют воздействие окружающей среды на рабочий функционал самой системы;
рабочий функционал – часть системы, которая отвечает за работоспособность и решение задач с требуемыми точностью и качеством.

Описанные выше компоненты можно представить в виде структурной схемы (рис. 2).

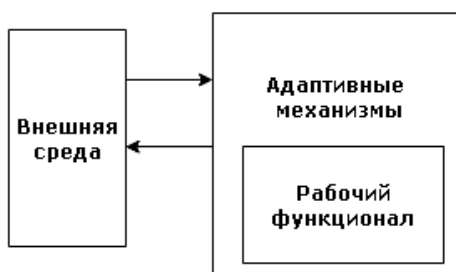


Рис. 2. Структурная схема вычислительной системы с разделением функциональной и адаптивной частей

В качестве примера использования схемы (см. рис. 2) можно указать процесс запуска операционной системы Android в виртуальной машине VirtualBox под Windows. Взаимодействие Android с Windows имеет свои особенности:

1. Внешней средой для Android выступает система Windows, обеспечивающая доступ виртуальной ОС к аппаратным функциям. Однако прямого доступа у Android к аппаратным ресурсам нет, так как Windows непосредственно контролирует аппаратное обеспечение. Чтобы получить доступ, нужно использовать вспомогательное решение – виртуальную машину.

2. Виртуальная машина VirtualBox является адаптивным механизмом получения доступа к ресурсам Windows из Android.

3. Функциональной частью является сама система Android, которую желает запустить пользователь.

Данный пример является простейшим, однако именно он показывает, что расширение изначальных возможностей по эксплуатации вычислительной системы (Android запускается на ноутбуке как самостоятельная система) возможно не только за счет улучшения функциональной части. При этом расширение эксплуатационных возможностей вычислительной системы неизбежно ведет к изменениям надежности [4]. Для вычислительных систем изменение функциональной части системы – процесс достаточно затратный, поэтому в рамках статьи построение детализированной структуры вычислительной системы целесообразно только с точки зрения систематизации и анализа защитных механизмов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При рассмотрении авторской концепции проектирования вычислительной системы необходимо отметить, что механизмы, предназначенные для защиты функциональной части, могут быть сгруппированы в подсистемы:

- 1) работы непосредственно с окружающей средой;
- 2) обработки часто возникающих отказов системы;
- 3) альтернативной остановки работы устройства;
- 4) управления работой адаптивных механизмов.

Если учитывать особенности построения вычислительных систем и особенностей условий эксплуатации, то одна часть представленных выше групп защитных механизмов может отсутствовать, а другая – присутствовать не полностью. Например, при анализе защитных механизмов в вычислительных системах, использующихся в сфере информационных технологий [5], набор защитных механизмов для большинства систем может выглядеть следующим образом:

1. Функционал защиты от перегрева различных микросхем. Важнейший механизм с различными функциями. Например, в ноутбуках при слишком сильном тепловыделении идет отключение всего устройства.

2. Функционал защиты от попадания грязи и от других внешних факторов. Это корпус устройства. Предназначение – защита вычислительной техники от грязи, излучения и прочих внешних агрессивных факторов.

3. Индикаторная функция. Данный функционал относится к категории диагностических средств. Индикаторная функция необходима с точки зрения анализа работоспособности компонентов, а также выявления ошибок.

4. Функция хранения и резервирования данных. Является специфической, представляет собой использование не только жесткого диска, но и системы RAID-массива (массива независимых дисков) для защиты данных, хранящихся на жестком диске, от потери. У современных пользователей эта функция выполняется с помощью внешних накопителей: флешек, съемных жестких дисков, оптических дисков.

5. Функция дублирования компонентов. Подразумевает наличие дублирующих компонентов вычислительной системы. В частности, это дополнительный МПС, включенный параллельно, видеокарта. Кроме того, данная функция реализована в RAID-технологии сохранения данных, однако самым ярким представителем является технология Hot Swap (технология горячей замены), позволяющая менять компоненты внутри системного блока без отключения питания. Используется в первую очередь на серверах.

Таким образом, структура вычислительной системы (см. рис. 2), дополненная детализацией адаптивных механизмов [6], преобразуется в структурную схему (рис. 3).

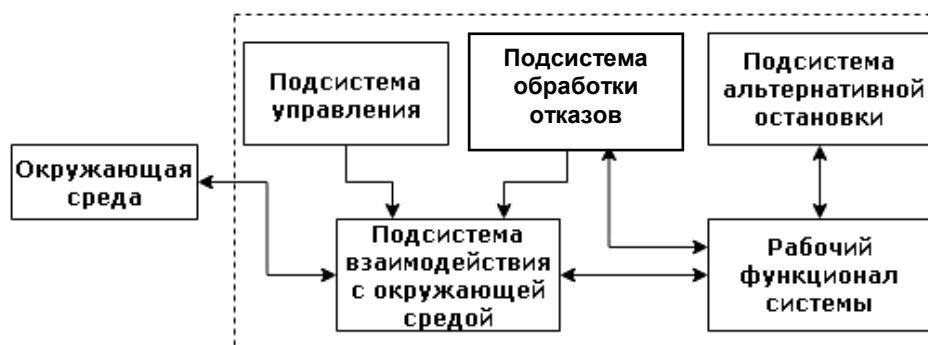


Рис. 3. Структура вычислительной системы, предназначенной для эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды, с учетом детализации адаптивных механизмов

Согласно представленной на рис. 3 структуре, состав вычислительной системы состоит из следующих компонентов:

1. Окружающей среды – внешних условий, в которых эксплуатируется вычислительная система. Принимаются за постоянные факторы воздействия.
2. Рабочего функционала системы – технических возможностей вычислительной системы.
3. Подсистемы взаимодействия с окружающей средой – непосредственной части адаптивных механизмов, взаимодействующая с окружающей средой.
4. Подсистемы управления.
5. Подсистемы обработки отказов.
6. Подсистемы альтернативной остановки.

В указанном списке пункты 1 и 2 являются стандартными. Они определяются в момент составления технического задания на разработку вычислительной системы, поэтому в рамках настоящей статьи разбираться не будут. Назначение оставшихся четырех компонентов, наоборот, будет рассмотрено, поскольку они являются составляющими адаптивных механизмов.

Таким образом, состав адаптивных механизмов включает следующие подсистемы:

1. Взаимодействия с окружающей средой.
2. Управления.
3. Обработки отказов.
4. Альтернативной остановки.

Подсистема взаимодействия с окружающей средой. Единственной задачей является обработка сигналов, поступающих из окружающей среды [7]. К сигналам можно отнести изменения влажности, радиоизлучение, подъем ветра, изменение уровня шума.

Детальный анализ функций подсистемы является избыточным. Рассмотрим стандартные возможности в контексте вычислительной системы остальных блоков.

Подсистема управления. Предназначена для управления защитными механизмами. Ее стандартный функционал – обеспечить эффективную работу защитных механизмов с учетом внешних окружающих факторов. Это достигается путем:

управления работой системы при смене условий внешней среды;

управления простейшими отказами системы. Для этого вызывается отдельная подсистема;

осуществления функции запасного управления. Это дает минимальную гарантию в случае утраты возможности управлять системой (такие случаи часто возникают при чрезвычайных ситуациях). Следует отметить, что в данном случае, как правило, используется функция аварийной остановки;

вызова экстренной остановки вычислительной системы. Это дополнительная функция.

Подсистема обработки отказов. Основное назначение – первичная диагностика и исправление ошибок. Иными словами, функционал этой подсистемы целиком зависит от доли повреждения внутренних компонентов системы. Для обработки отказов подсистема использует механизмы:

переключения между дублирующими частями системы. Способ используется при полном выходе из строя (в процессе работы) системы соответствующего элемента, который отвечает за выполнение системных задач;

отключения поврежденных элементов системы. Осуществляется при неисправности элемента, когда его дальнейшая работа вредит системе;

обмена данными с подсистемой управления. Координирует действия системы управления на основе имеющихся данных;

передачи аварийного сигнала в подсистему альтернативной остановки.

Подсистема альтернативной остановки. Предназначена для экстренных случаев, когда вычислительную систему необходимо срочно остановить. Например, при перегреве вычислительной системы (ноутбука) аппаратная операционная система (BIOS или UEFI) отключает питание [8]. Такие возможности имеются не во всех вычислительных системах, однако в большинстве случаев они есть в ядерных установках или космических аппаратах. Основные функции данного блока:

1) выполнять остановку системы в условиях, когда повреждено внешнее управление. Функция исключает потерю контроля (недопустимую независимо от степени повреждения) в работе вычислительной системы;

2) останавливать систему при критических нарушениях блока, отвечающего за взаимодействие вычислительной системы с окружающей средой. При этом дальнейшая работа системы, как правило, невозможна, следовательно, ее проще остановить, так как в противном случае будет потеряно управление и может произойти катастрофа;

3) останавливать систему по команде от подсистемы управления;

4) останавливать систему при отказе работы подсистемы обработки отказов. Когда подсистема обработки отказов перестает работать, это означает, что у вычислительной системы остался минимальный запас прочности, так что отключение всей вычислительной системы позволит сохранить техническую работоспособность. Данная функция используется не везде, а в некоторых случаях и вовсе не используется. Например, для необитаемых спутников указанная функция не требуется, так как проводить ремонт некому;

5) осуществлять дублирование механизмов остановки, реализованных в функциональной части (резервный механизм для остановки системы).

Данная подсистема отличается максимальным быстродействием в сравнении с остальными, поскольку является критическим ресурсом для предотвращения технических неустранимых отказов.

Таким образом, были рассмотрены и классифицированы основные элементы адаптивной части вычислительной системы, а также предложена классификация технического обслуживания вычислительной системы с учетом классификации вычислительной системы.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работах по системному анализу рассматривались различные аспекты внутреннего устройства систем и концепции их построения. Однако структуру вычислительных систем, при помощи которой можно было бы описать набор требований, не изучали. Например, в работе [9] показано использование автоматической обработки отказов и системы автоматического обслуживания, однако отсутствует структурирование внутренних механизмов как абстрактной категории.

В исследованиях [10, 11] был рассмотрен методологический подход к сигналам с точки зрения системного анализа, однако техническое обслуживание в качестве системной категории не приведено, также не классифицированы в общем виде внутренние механизмы защиты вычислительной системы.

Необходимость рассмотрения расширенной структуры вычислительной системы (рис. 3) связана в первую очередь с особенностями космического пространства. В нем активно распространяется ионизирующее излучение, воздействие которого приводит сначала к небольшим повреждениям, а затем к неустранимому отказу аппаратной части системы. Ионизирующее излучение, воздействующее на центральную часть МПС AMD64, схематически изображено на рис. 4.

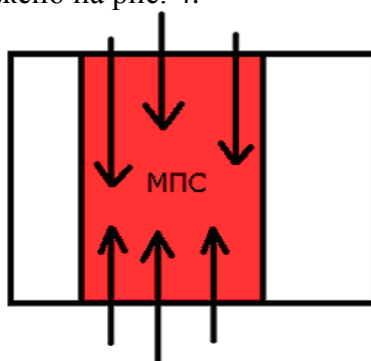


Рис. 4. Схема воздействия излучения на МПС

Для реализации защиты МПС от излучения необходимо использовать защиту не функциональную (так как полупроводниковые приборы более подвержены воздействию излучения, чем их предшественники – электровакуумные приборы), а через адаптивные механизмы.

Если брать во внимание общую классификацию, такими механизмами могут быть:

1. Дополнительный внешний корпус – подсистема взаимодействия с окружающей средой.
2. Датчик аварийного отключения при перегреве – подсистема аварийной остановки.
3. Элементы внутренней диагностики – подсистема обработки отказов.

4. Управляющая подсистема с набором МПС на материнской плате – подсистема управления.

Таким образом, данная структура подразумевает, что космическая техника требует иных стандартов при разработке (как элементной базы, так и методологии проектирования). Расширенная структура вычислительных систем может помочь при разработке методологии и определении стандартов для эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная структура вычислительных систем дает возможность определить особенности проектирования отдельных элементов. Например, при проектировании вычислительных систем для пользователей, которым нужен простой стационарный компьютер, достаточно использовать обычные внутренние механизмы в виде корпуса, радиатора или водяного охлаждения, а также стандартный функционал, характеризующийся набором программного обеспечения, необходимого конкретному пользователю (с учетом его бюджета).

При разработке систем, которые должны эксплуатироваться на ТЭЦ, необходимо предусмотреть особую защиту от попадания пыли и грязи на вычислительную технику, а в ситуации, когда идет разработка вычислительной системы для космической отрасли, на первом месте должны стоять механизмы управления и обработки отказов, подсистема восстановления и т.д.

Таким образом, использование детализированной структуры вычислительной системы позволяет улучшить методологию проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. СПб.: Питер. 2013. 843 с.
2. Мокряков А.В., Приходько Д.И. Общие концепции и идеи теории эксплуатации в контексте вычислительной техники // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки»*. 2020. № 12. С. 88–92.
3. Мокряков А.В., Приходько Д.И. Критерии анализа эксплуатационных характеристик первичных мультизагрузчиков // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки»*. 2020. № 12. С. 93–96.
4. Романова Ю.Д. Информатика и информационные технологии. М.: Эксмо. 2009. 320 с.
5. Липаев В.В. Системное проектирование сложных программных средств для информационных систем. М.: Синтег. 2002. 268 с.
6. Приходько Д.И. Разработка и оптимизация методов эксплуатации информационных систем как этапа их жизненного цикла с учетом воздействия агрессивной внешней среды. Дисс... магистерская. Москва. 2021. 204 с.
7. Липаев В.В. Процессы и стандарты жизненного цикла сложных программных средств. Справочник. М.: Синтег. 2006. 276 с.
8. Вирт Н., Гуткнехт Ю. Разработка операционной системы и компилятора. Проект Оберон. М.: ДМК Пресс. 2017. 560 с.
9. Амбарцумян А.А., Хадеев А.С. Анализ функциональности систем управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования // *Проблемы управления*. 2005. № 6. С. 2–12.
10. Цветков В.Я. Теория систем. М.: МАКС Пресс. 2018. 87 с.

11. Цветков В.Я. Системный анализ при обработке информации. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 92 с.

Для цитирования: Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В. Обзор структуры вычислительной системы, предназначенной для эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 96–103.

EXPANDED INTERNAL STRUCTURE OF COMPUTER SYSTEM INTENDED FOR OPERATION IN EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS

D.I. PRIKHODKO¹, Master, A.V. MOKRYAKOV^{2,3}, Cand. Sc.,
V.V. GORSHKOV³, Dr. Sc.

¹FSC Research Institute for System Research RAS
bld. 1, 36, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russian Federation,
e-mail: mitry1205@mail.ru

²Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe Hwy., Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: ali.latex@gmail.com

³Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)
1, st. Malaya Kaluzhskaya, Moscow, 119071, Russian Federation,
e-mail: gorshkov-vv@rguk.ru

The article discusses the issue of a detailed representation of the mechanisms of a computer system from the point of view of a system approach, which as a result allows you to determine the necessary criteria and a set of regulations for the development and operation of computer systems. Maintenance structure is considered for proposed structure of computer system.

Keywords: structure of the computer system, extreme environmental conditions.

Поступила в редакцию/received: 10.01.2023; после рецензирования/revised: 31.01.2023;
принята/accepted: 06.02.2023

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 3 (19), 2023**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Редактор С.В. Борисов
Корректор Я.А. Петрова

Подписано в печать 10.07.2023

Дата выхода в свет 13.09.2023

Формат 60 × 84/8

Физ. печ. л. 13

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 12,09

Цена свободная

Заказ № 325

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,31

С – 104

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14